

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Liberec 2008



Monika Gurová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Študijný program: M3106 – Textilné inžinierstvo

Študijný obor: 3106 T – Textilná technológia

Katedra textilných technológií

JEDNOOSÉ STLAČOVANIE VLÁKENNÉHO
ÚTVARU

UNIAXIAL COMPRESION FIBRES SYSTEMS

Autorka:

Monika Gurová

Vedúci diplomovej práce:

Prof. Ing. Bohuslav Neckář, DrSc.

Konzultant diplomovej práce:

Ing. Jaroslav Hanuš, Ph.D.

Počet strán textu: 49

Počet obrázkov: 14

Počet tabuliek: 3

Počet grafov: 9

Počet príloh: 3

originál zadanie

Prehlásenie

Prehlasujem, že predložená *diplomová* práca je pôvodná a spracovala som ju samostatne. Prehlasujem, že citácia použitých prameňov je úplná, že som v práci neporušila autorské práva (v zmysle zákona č. 121/2000 Sb. O práve autorskom a o právach súvisiacich s právom autorským).

Súhlasím s umiestnením *diplomovej* práce v Univerzitnej knižnici TUL.

Bola som zoznámená s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č.121/2000 Sb. o práve autorskom, najmä § 60 - školské dielo.

Beriem na vedomie, že TUL má právo na uzavretie licenčnej zmluvy o užívaní mojej diplomovej práce a prehlasujem, že **s ú h l a s í m** s prípadným užitím mojej diplomovej práce (predaj, zapožičanie, kopírovanie apod.).

Som si vedomá toho, že užiť svoju diplomovú prácu či poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem iba so súhlasom TUL, ktorá má právo odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, vynaložených univerzitou na vytvorenie diela (až do jej skutočnej výšky).

V Liberci, dňa 10.05.2008

.....

Podpis

Pod'akovanie

Touto cestou by som rada poďakovala Prof. Ing. Bohuslavovi Neckářovi, DrSc. za jeho odborné vedenie, rady a cenné pripomienky. Ďakujem taktiež patrí Ing. Jaroslavovi Hanušovi, Ph.D. a Doc. Ing. Pavlovi Rydlovi, Ph.D za obetavý prístup a pomoc pri riešení problémov.

Ďalej by som chcela poďakovať svojim rodičom za psychickú podporu a materiálnu pomoc, ktorú mi v priebehu štúdia preukazovali.

Anotácia

Táto práca je venovaná štúdií distribúcie tlaku vo vlákenných útvaroch. Ďalej je rozvedená problematika stlačovania, závislosť zaplnenia na tlaku a distribúcia tlaku vo dvoch rovinách kolmých na zaťažujúcu silu.

Diplomová práca mapuje vývoj vlastnej metódy skúmania šírenia tlaku vo vybraných druhoch vlákenných materiálov. Interpretované výsledky sú overované s teoretickým modelom C. M. van Wyka.

Annotation

This thesis deals with a study of a pressure distribution in filamentary formations. Furthermore, it analyses a compacting issue, a dependence of a filling on pressure and a pressure distribution in two orthogonal levels on loading power.

The diploma thesis maps a development of the actual investigative method of a pressure spreading in selected types of filamentary formations. The interpretive results are verified with C.M. van Wyk's theoretical pattern.

Kľúčové slová: tlak, distribúcia tlaku, zaplnenie, deformácia,
stlačovanie vlákenného útvaru

Key words: pressure, pressure distribution, filling, deformation,
compacting of filamentary formation,

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Rešerše danej problematiky.....	10
2.1 Starodobé a novodobé poznatky	10
3. Teoretická časť	14
3.1 Definícia tlaku, napätia a deformácie	14
3.2 Stlačovanie vlákenných útvarov	16
3.3 Vzťah medzi stlačením a zaplnením vlákenného útvaru.....	17
3.4 Jednodimenzionálna deformácia vlákenného útvaru	18
3.5 Dvojdimenzionálna deformácia vlákenného útvaru.....	22
3.5.1 Prenos priečných tlakov vo vláknennom útvare podľa J. W. S. Hearle a H. M. A. E. El-Behery.....	23
4. Experimentálna časť	27
4.1 Cieľ experimentálneho merania	27
4.2 Návrh experimentu.....	27
4.2.1 Výber a charakteristika materiálu	27
4.2.2 Príprava materiálu	28
4.2.3 Meranie distribúcie tlaku	30
4.2.4 Uloženie vlákenného materiálu v meracom zariadení.....	32
4.2.5 Kalibrácia tenzometrických snímačov	35
4.2.6 Prepočet elektrického napätia na hodnoty síl a tlaku	35
5. Výsledky merania.....	37
5.1 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt.....	37
5.2 Komparácia vzťahu (14) C. M. van Wyka s experimentálnymi hodnotami.....	38
5.2.1 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek tlaku Pa.....	40
5.2.2 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek tlaku Pb.....	41
5.2.3 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek pomeru tlakov Pb/Pa	42
5.3 Vplyv jemnosti vlákien na chovaní materiálu pri stlačovaní	43
6. Záver.....	45
7. Zoznam použitej literatúry	47
Zoznam príloh	49

Zoznam symbolov a skratiek

A	[N]	vertikálna sila pôsobiaca na meranú vzorku
a,b,c ₀	[m]	základný rozmer štruktúrálnej jednotky
a _k	[m]	šírka kváдру meracieho zariadenia
a	[-]	exponent zaplnenia
atď.		a tak ďalej
B		tenzometrický snímač pre snímanie horizontálnych síl
b _k	[m]	výška meracieho zariadenia
C		tenzometrický snímač pre snímanie horizontálnych síl
c	[m]	výška vlákenného materiálu po stlačení
č.		číslo
E	[Pa]	modul pružnosti (Youngov modul)
F	[N]	sila
k	[m ³]	konštanta úmernosti
k _B , k _C		kalibračné konštanty
k _p	[kPa]	súhrny parameter vlákenného materiálu
k _δ	[m]	parameter materiálu
l	[mm]	dĺžka vlákien
m	[g]	hmotnosť vzorku
napr.		napríklad
obr.		obrázok
p	[kPa]	tlak
P _A (Pa)	[kPa]	tlak pohyblivého horného piestu
P _B (Pb)	[kPa]	tlak pôsobiaci na bočnú stenu meracieho zariadenia
P _C (Pc)	[kPa]	tlak pôsobiaci na bočnú stenu meracieho zariadenia
PES		polyester
PP		polypropylén
S	[m ²]	plocha
T	[dtex]	jemnosť vlákien
tab.		tabuľka
tj.		to je
tzv.		takzvané
U	[m]	hodnota posuvu horného piestu z počiatočnej polohy
U _B , U _C	[mV]	hodnoty napätia snímačov B a C
V _c	[m ³]	celkový objem skúmaného tvaru

V_{vl}	[m ³]	celkový objem vlákien
v	[%]	variačný koeficient
w	[m ³]	objem vlákna v granuly
ε	[mm]	pomerne predĺženie
μ	[-]	zaplnenie vlákenného materiálu po stlačení
μ_m	[-]	medzné zaplnenie
μ_0	[-]	počiatočné zaplnenie
ρ	[kg/m ³]	merná hmotnosť vlákien
σ	[Pa]	napätie v tlaku
σ_{jj}, σ_{ii}	[Pa]	na seba kolmé skutočné napätia
u	[-]	hustota kontaktov

1. Úvod

Jednou z nevyhnutelných súčasti života je textilný materiál, ktorý hýbe svetom. Spracovanie je rozmanité, ale vždy špecifické pre daný druh materiálu. Neoddeliteľnou súčasťou spracovania je neustále zlepšovanie rozličných vlastností a komfortu výsledných produktov. Aby toho bolo možné doceliť je potrebné poznať štruktúru jednotlivých materiálov. Jedným z dôležitých ovplyvňujúcich faktorov sú kompresné vlastnosti. Touto problematikou sa po dlhé roky zaoberala nemalá časť vedeckých osobností. Hlavným cieľom výskumu je snaha nájsť vzťahy medzi individuálnymi vlastnosťami vlákenných materiálov a teoretické modely popisujúce šírenie tlaku vo vlákennom systéme. Aj napriek veľkej snahe bádateľov tento proces zostáva aj naďalej neobjasnený.

Prvým autorom snažiacim sa popísať chovanie vlákenných útvarov pri deformácii bol C. M. van Wyk. Jeho teoretický model sa stal prototypom pre ďalší výskum a aj v súčasnosti je využívaný v mnohých experimentoch. Stručnému prehľadu obdobi vývoja a zdokonaľovania teoretického modelu je venovaná kapitola 2.1. Nasledujúca kapitola sa zaoberá definovaním tlaku a deformácie vo vlákenných systémoch. Zvláštna pozornosť je venovaná teoretickému odvodeniu modelu jednodimenziálnej a dvojdimenziálnej deformácii a prenosu priečnych tlakov vo vlákennom útvare.

Experimentálna časť tejto diplomovej práce popisuje cieľ a metódu merania distribúcie tlaku vo vlákennom útvare a prípravu vlákených vzorkou. Vlastné meranie prebiehalo na Katedre netkaných textílií Technickej univerzity v Liberci pomocou trhacieho prístroja Labtest 2.050. Záverečné kapitoly práce sú venované vyhodnoteniu experimentálneho merania a diskusie dosiahnutých výsledkov.

2. Rešerše danej problematiky

2.1 Starodobé a novodobé poznatky

V objasňovaní kompresného chovania vo vlákennom útvare sa stal prelomom rok 1946. Časopis *Journal of Textile Institute* uverejnil článok pod názvom „Note on the Compressibility of Wool“ („Poznámky ku stlačiteľnosti vlny“), ktorého autorom bol **C. M. Van Wyk**. Vyvinul teóriu a navrhol prvý model o kompresnom chovaní vo vlákennom materiáli. Vo svojom článku uvádza, že pri každom nasledujúcom stlačení a uvoľnení vlny sa krivky hodnôt tlaku menia, ale v záveru dosahujú stability.[1] Tento model sa stal prototypom pre skúmanie ďalších bádateľov. Zožal s ním veľké úspechy, ale i cez to obsahoval radu nedostatkov. Van Wyk nebral do úvahy niekoľko obmedzujúcich faktorov ako je napr.: zvlnenie vlákien a ich orientácia, sklz, deformácia, vzájomné trenie, atď. Vďaka týmto predpokladom bolo nutné zaviesť empirickú konštantu k_p , ktorá berie v úvahu rozdielne vzdialenosti medzi kontaktmi vlákien, variabilitu priemeru, prierezu a charakteristické črty vlákien. Tiež odvodil vzťahy pre počet kontaktov n :

$$n = \frac{\pi l^2 d}{4V} \quad (1)$$

a vzdialenosti medzi kontaktmi b :

$$b = \frac{2V}{\pi l d} \quad (2)$$

vo vlákennom útvare. Tieto rovnice berú v úvahu celkovú dĺžku vlákien l , priemer vlákna d a objem vlákenného útvaru V . Podľa teórie C. M. van Wyka rastie počet kontaktov o tretinu pri stlačení počiatočného objemu vlákien na 75 % [1].

Nadviazaním na tuto problematiku sa rada vedcov pokúsila odstrániť jej nedostatky. Jedným z nich bol **T. Matsuo**, ktorý rozšíril Van Wykovu teóriu ohnutého nosníku o zvlnenie a orientáciu vlákien. Jeho teória obsahuje dva parametre vzťahujúce sa k novo zakomponovaným faktorom. Jedným z faktorov je exponent g určujúci funkčnú závislosť tlaku na napätí. A však tieto faktory boli predstavené na čiastočne neúplnom teoretickom základe. Preto nemohol byť exponent plne stanovený z vlákien a objemových vlastností a teda s týmito parametrami je zachádzané ako

s voľnými. T. Matsuo dokázal, že exponent g nie je konštantný, ale môže sa meniť s každým objemom [2].

V roku 1971 **A. E. Stearn** vytvoril predpoklad:

$$\cot \theta / \cot \theta_c = \sigma \quad (3)$$

kde θ je uhol medzi krátkou dĺžkou vlákna a osou počiatočnej kompresie, θ_c je rovnaký uhol po kompresii a σ je pomer kompresie. Týmto bolo možné odvodiť opravu faktorov pre niekoľko kontaktov v počiatočných náhodných vlákenných útvaroch. Dokázal, že kompresný pomer sa zvyšuje a počet kontaktov na jednotku objemu sa stále viac odchyľuje od Van Wykových predpokladov [3].

T. Komori a K. Makishima sa zaslúžili o zovšeobecnenie Stearnovho predpokladu, ktorý v počiatku spočíval na nenáhodnom usporiadaní vlákenného útvaru, tým že predstavil orientáciu hustoty funkcie $\Omega(\theta, \Phi) \sin \theta$, kde θ je diametrálne odlišný uhol pre ľubovoľný krátky úsek vlákien, Φ je vedľajší uhol medzi osou x a projekciou na časti plochy $x - y$. $\Omega(\theta, \Phi) \sin \theta d\theta d\Phi$ je pravdepodobnosť, že orientácia časti, ktoré sú ležiace medzi θ a $\theta + d\theta$ a tiež medzi Φ a $\Phi + d\Phi$. Z tejto obecnej hustoty funkcie boli schopný derivovať počet kontaktov vo vlákenných útvaroch [4]. Špecifikované výsledky aplikovali na rôznych prípadoch, v ktorých sa ich teória zhodovala s Van Wykovov.

Ďalšími zaslúžilými vedcami boli **D. H. Lee a J. K. Lee**, ktorí sa pokúsili o zdokonalenie teórie stlačovania. Skombinovaním Van Wykovej, Komoriho a Makishimovej ideí, kde brali v úvahu medzivlákné kontakty a orientáciu vo vláknennom útvere odvodil prvý anizotropný model a použil Poissonov koeficient. Podali teoretický predpoklad, ktorý porovnali s experimentálnymi výsledkami pre konštantu tlakového chovania na obmedzenej strane steny k aplikovanému tlaku. Upozornili však, že ich predpoklady modelu počiatočnej kompresie boli príliš vysoké pre náhodne orientované vlákenné útvary. Bolo to čiastočne z dôvodu zanedbania vlákenného sklzu [5].

V schéme Leeho a Leeho predstavili **G. A. Carnaby a N. Pan** sklzové kritérium, kritický sklzový uhol, ktorý dovoľoval dotyk bodov vo vlákenej mase. Kontaktné body boli rozdelené do dvoch kategórií a to na sklzové a bez sklzu vlákien. Bolo možné s nimi zachádzať oddelene. Uspeli v objasnení hysterézie pri kompresii a zotavení. Títo vedci boli prví, ktorí použili počítačovú simuláciu k tomu, aby predpovedali tvar hysteréznej slučky pre cyklickú kompresiu a uvoľnenie. Výpočty boli založené na Leeho a Leeho geometrických predpokladoch. Tieto výskumne skupiny rovnako ako Van Wyk a Matsuo predpokladali, že všetky ohybové elementy vlákien majú rovnakú

dĺžku bez ohľadu na ich orientáciu a dĺžka sa rovná dĺžke voľného vlákna s ohľadom na smer [6].

Skupina vedcov pozostávajúca z **D. H. Lee**, **G. A. Carnaby** a **S. K. Tandon** predstavili model založený na princípe použitia minimálnej energie. Skúmali účinok kompresných vlastností na štruktúre s rovnakými parametrami a deformačné vlastnosti. Pomocou gama funkcie charakterizovali distribúciu segmentov dĺžok vlákien a pre krivosť vlákenných segmentov vytvorili rovnicu, týkajúcu sa efektívneho priemeru vlákien a ich zvlnenia. Model ukázal, že pokiaľ by došlo k zväčšeniu zvlnenia vlákna pre danú geometriu počiatočného stavu, tangenta modulu sa v skutočnosti zníži. Tieto vzťahy nemôžu byť experimentom potvrdené, pretože počiatočná geometria vlákien nie je presne definovaná [7, 8].

Ďalším predstaviteľom problematiky objemového chovania vlákenných útvarov je **J. I. Dunlop**. Predstavil experimentálne výsledky a modely ilustrujúce fenomén sklzu hysterézií a nenávratného stlačenia. Dokázal, že tlak verzus inverzný objem kubického zakrivenia v mase vlákien je vystavený cyklickému tlaku a uvoľnenie je nelineárne. Skúmal akustické emisie vo vlne behom kompresie a uvoľnenia. Výsledkom jeho skúmania je exponenciálne zvýšenie v pomere emisií behom kompresie a konštantný pomer emisií behom uvoľnenia. Dunlop predstavil tri základné modely zahrňujúce kombináciu nelineárnych pružín a trecích blokov pri pokuse reprodukcie experimentálneho zakrivenia. Jeden z troch modelov ukázal hysteréznú slučku s tvarom podobným skutočnej vlákenej mase, i napriek tomu, že nenávratná kompresia sa zvýšila len po niekoľko cyklov [9, 10].

Doposiaľ prezentované výsledky a pokusy sa zdali neuspokojivé po stránke kvantitatívnej i kvalitatívnej reprodukovateľnosti. Preto sa D. H. Lee, G. A. Carnaby, A. J. Carr a P. J. Moss pokúsili dokázať pravdepodobnú nepravidelnosť v dĺžke ohýbaného celku, počet základných bodov na vlákne a iné. Tento problém sa im nepodarilo plne vyriešiť. O vyriešenie tohto problému sa pokúsili **M. Itoh** a **T. Komori**, ktorí skúmali rolu zvlnenia vlákna použitím modelu, v ktorom predpokladali špirálový prameň ako ohýbaný celok a porovnali teóriu s Matsuovov. Výsledkom bolo zistenie, že zvlnenie vlákna znateľne ovplyvňuje závislosť napätia na deformácií. Vypočítané napätie sa menilo takmer priamoúmerne k obrátenému objemu ($g = 1$), nie však k inverzným trojdimenzionálnym objemom ($g = 3$) a funkčná charakteristika bola príliš odlišná od reality [11, 12].

O zlepšenie modelu ohýbaného nosníku vytvoreného Lee, Carnaby a Tandon sa zaslúžili **T. Komori**, **M. Itoh** a **A. Takaku**. Snažili sa odvodiť rovnicu kompresie, ktorá berie v úvahu účinok vlákenného zvlnenia a následne ju porovnali s Matsuovým experimentom. Použili široký rozsah napätí a ich analýza vyprodukovala veľkú

kvalitatívnu úvahu závislosti napäťového zakrivenia vo vzorkách, ktorých štrukturálne vlastnosti neboli regulované parametrami. Napriek tomu zostal problém preceňovaného napätia ponechaný ako problém, ktorý bude potreba vyriešiť v budúcnosti. Domnievali sa, že numerické nezhody môžu čiastočne súvisieť s počiatočnou distribúciou [13].

Ďalším predstaviteľom zdokonaľovania problematiky stlačovania vlákenného útvaru bol **P. B. Baljasov**. Zisťoval závislosť medzi pôsobením tlaku a deformáciou. Svoj experiment prevádzal na rôznych druhoch vlákenných materiálov, ktoré stlačoval v tuhej krabicike pod pôsobením tlakov v rozmedzí $3 \cdot 10^{-4}$ - $3 \cdot 10^{-3}$ [MPa] za rôznych časových a klimatických podmienok. Výsledky experimentálneho merania porovnal s van Wykovými matematickými výrazmi [14].

V našich končinách na prácu C. M. van Wyka a P. B. Baljasova nadviazal **B. Neckář**. Vychádzal z predstavy ideálne rozložených vlákien v systéme, ktoré sú namáhané na ohyb, ktorú modifikoval a obecné popísal aj pre oblasť stredných a vysokých napätí. Od výše zmienených vedcov prevzal namerané dáta a porovnal ich so svojimi teoreticky odvodenými vzťahmi. Výsledkom bola vysoká zhoda priebehu teoretických a experimentálnych kriviek [15].

3. Teoretická časť

3.1 Definícia tlaku, napätia a deformácie

Tlak je fyzikálna veličina, obvyčajne označovaná symbolom p (z anglického pressure). Je to tlak, ktorý vyvoláva sila 1 newtonu (1 N), rovnomerne a spojitاً rozložená a pôsobiaca kolmo na plochu o obsahu 1 štvorcového metra (1 m²).

$$p = \frac{F}{S}. \quad (4)$$

Hlavnou jednotkou tlaku v sústave SI je pascal (Pa), čiže newton na meter štvorcový - N.m⁻². V technickej praxi sa používajú hlavne násobky kilopascal (kPa, tj 10³ Pa) a megapascal (MPa, tj. 10⁶ Pa), v geológii a geofyzike i gigapascal (GPa, tj. 10⁹ Pa). V meteorológii je obvyklé uvádzať tlak vzduchu v jednotkách hektopascal (hPa, tj. 100 Pa), pretože normálny tlak atmosféry je blízky tisícnásobku tejto jednotky (presne 1013,25 hPa). Vo vákuovej technike sa používajú menšie jednotky ako milipascal (mPa, tj. 10⁻³ Pa) a mikropascal (μPa, tj. 10⁻⁶ Pa).

Tlak neúčinkuje iba v bode pôsobenia sily, ale prenáša sa objemom telesa. Patrí k základným termodynamickým veličinám.

Pokiaľ vektor sily pôsobí iba kolmo, hovoríme o "prostom", "čistom" resp. "rovnomernom" tlaku, ak sila nie je po ploche rozložená rovnomerne potom hovoríme o "strednom" resp. "priemernom" tlaku, ak sila pôsobí v bode hovoríme o "miestnom" tlaku, tj. tlakom pôsobiacom v bode uvažovanej plochy rozumieme diferenciálny podiel

$$p = \frac{dF}{dS}. \quad (5)$$

Zovšeobecnením definície tlaku (pre sily pôsobiace ľubovoľným smerom na všeobecnú plochu) môžeme zapísať rovnicu:

$$dF_s = p dS, \quad (6)$$

kde dF_s je zložka vektora sily kolmá k elementu plochy dS na ktorý pôsobí, pričom smer vektora elementu dS má smer normály k tejto plôške.

Ak je látka pružná, resp. stlačiteľná, tlak spôsobí deformáciu. Pri pôsobení tlakovej sily na pevné teleso sa rozlišuje ťah a tlak. Ťahová sila spôsobí roztiahnutie telesa, tlaková sila stlačenie telesa. Ťahové a tlakové sily sa odlišujú iba smerom pôsobenia sily (opačný vektor sily) [16].

Mechanické napätie je stav, ktorý vznikne v telese ak naň pôsobia účinky síl. Inak povedané, napätie je miera vnútorného rozloženia síl na jednotkovú plochu telesa, ktorá vyrovnáva účinok vonkajšieho zaťaženia, alebo okrajových podmienok pôsobiacich na teleso.

Silové napätie v hmote, alebo aj napäťový stav látky, je vyjadrením vnútorných silových pomerov v látke, t. j. toho ako na seba pôsobia dve vzájomne susediace časti látky.

Pretože sila, ktorou na seba pôsobia tieto dve časti je závislá na veľkosti plochy na ktorej sa tieto časti stýkajú, sila sa vyjadruje pomocou napätia σ , čo je pomer medzi veľkosťou sily F a plochou S na ktorú táto sila pôsobí:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (7)$$

Silové napätie vyjadruje iba vnútorné sily v látke, ktorým sa hovorí aj plošné sily. Okrem nich existujú aj objemové, alebo hmotné sily, ktoré pôsobia na každú časticu látky priamo (nie sprostredkované cez susedné častice ako pri vnútorných silách) a často na veľkú vzdialenosť (gravitácia, elektromagnetizmus) [17].

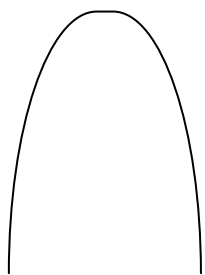
Pojmom **deformácia** telesa rozumieme zmenu jeho tvaru. Teleso mení tvar v dôsledku pôsobenia sily. Silové pôsobenie mení vzájomné polohy atómov, z ktorých sa teleso skladá. V prípade, že sa po odstránení pôsobiacej sily teleso vráti do pôvodného tvaru, hovoríme o pružnej (elastickej) deformácii. Pružná deformácia sa vyskytuje v pružných látkach. Z dôvodu pôsobenia síl, taktiež môže dôjsť k nevratným zmenám v polohe atómov telesa. Po odznení pôsobenia síl sa tvar telesa už nevráti do pôvodného stavu. V tomto prípade hovoríme o nepružnej (plastickej) deformácii. Sily pôsobiace na teleso je možné rozlišovať podľa druhu napätia, ktoré teleso vyvolávajú, označované ako deformačné sily [18].

3.2 Stlačovanie vlákenných útvarov

Vlákná, vlákenné útvary, plošné textílie i hotové výrobky podliehajú v priebehu svojho spracovania rade zaťažujúcich dejov, ktorých súčasťou je aj stlačovanie. Pod pojmom stlačovanie sa rozumie vzťah medzi deformáciou a napätosťou vlákenných útvarov. Proces je zložitý a po stránke teoretickej i experimentálnej nie je dosiaľ úplne objasnený. Pri pôsobení veľkých tlakov narastá zložitosť procesu stlačovania. Dochádza k zmenám mechanizmu deformácie a vzniku niektorých vedľajších javov, ktoré nesúvisia s pružnosťou materiálu [8]. Kompresné vlastnosti vlákenného materiálu sú ovplyvnené radou faktorov:

- vlastnosťami použitých vlákien
- usporiadaním vlákien v systéme
- zaplnením systému textilnými vláknami
- dĺžkou voľných segmentov vlákien medzi väznými miestami
- druhom a distribúciou väzných miest

Z hľadiska stlačiteľnosti považujeme za rozhodujúce uloženie vlákien v systéme. Sú známe dve charakteristické ukotvenia vlákien vo vlákennom útvare a to **horizontálne** (obr. č.1b) namáhané na ohyb a **vertikálne** (obr. č. 1a) namáhané na vzpier. Z toho vyplýva, že horizontálne uložené vlákna kladú ďaleko menší odpor voči stlačovaniu než vertikálne uložené vlákna [8, 19].



a)



b)

Obr. č. 1: Charakteristické uloženie vlákien vo vlákennom útvare:
(a) vertikálne uloženie, (b) horizontálne uloženie

3.3 Vzťah medzi stlačením a zaplnením vlákenného útvaru

Textílie sú rozdelené do niekoľkých kategórií a to na tkaniny, pleteniny a netkané textílie. Tieto kategórie ale majú radu spoločných prvkov a dejov, aj keď prebiehajú v nejakej obmene. Spoločným prvkom a zároveň základnou stavebnou jednotkou je vlákno. Vlákna sú orientované v požadovaných smeroch. Teda usporiadané prevažne v jednom smere, alebo sú neusporiadané (uložené v rôznych smeroch). Nezáležiac na orientácii vo všetkých prípadoch dochádza k vzájomnému priblíženiu vlákien a tým dochádza k dotyku. V mieste dotyku, teda v **kontaktnom mieste** vzniká **kontakt** (viz obr. č. 2) [20].



Obr. č. 2: Kontakt medzi vláknami podľa [20]

V týchto kontaktných miestach dochádza k prenosom energie a sily. Zároveň stlačovaním vlákenného útvaru vzniká väčší počet kontaktov, čiže sa zvyšuje zaplnenie útvaru. Počet kontaktov je závislý od vlastností vlákien a vlastností vytvorenej štruktúry. Počtom kontaktov je možné vyjadriť hustotu kontaktov ν obsiahnutú v jednotke objemu V_c vlákenného útvaru podľa vzťahu:

$$\nu = \frac{n}{V_c} = k_v \mu^2, \quad (8)$$

kde k_v je závislá na priemeru d použitých vlákien a tiež na ich smerovom usporiadaní, μ je zaplnenie vlákenného útvaru [18].

Zaplnenie μ vlákenného útvaru, respektíve jeho objemovú definíciu vyjadrujeme pomerom objemom vlákien V_{vl} k celkovému objemu skúmaného tvaru V_c .

$$\mu = \frac{V_{vl}}{V_c}, \quad (9)$$

pritom platí, že $V_c \geq V_{vl}$ a rozdiel $V_c - V_{vl}$ vyjadruje objem vzduchu medzi vláknami [20]. Zaplnenie je bezrozmerná veličina a leží v intervale $<0,1>$.

3.4 Jednodimenzionálna deformácia vlákenného útvaru

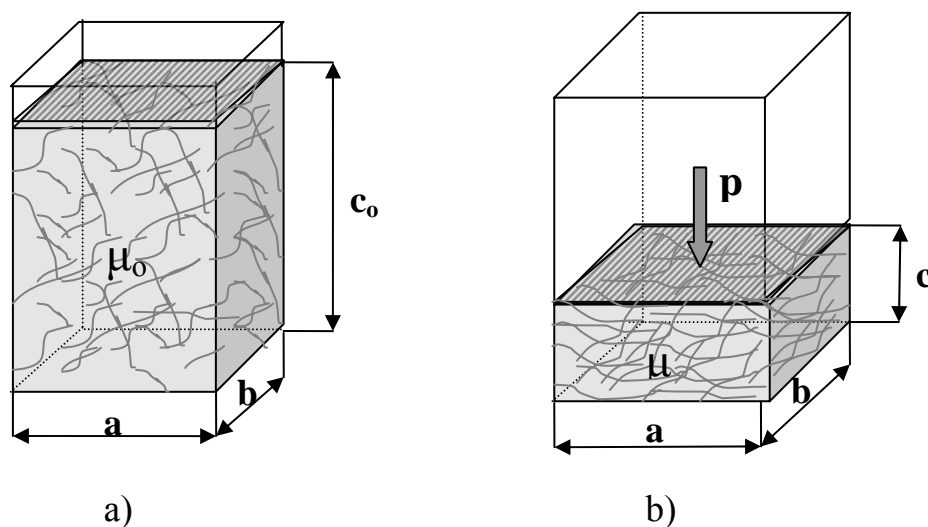
Chovanie vlákien vo vlákenných útvaroch závisí na dispozíciách samotných vlákien a samozrejme na morfológií vlákenej štruktúry. Morfológický výskum sa zaoberal radou problémov ako napr. zaplnením priestoru hmotou vlákien, tvarom vlákenných útvarov, orientáciou, medzivlákennými kontaktmi apod. Stlačovanie je veľmi zložitý proces, pri ktorom dochádza k rôznym formám disipácie energie a taktiež vo vlákennom útvare prebiehajú reologické javy [20].

Obr. č. 3 znázorňuje model jednoosého stlačovania vlákenného útvaru podľa C.M. van Wyka, ale je to len čiastočné riešenie celej problematiky. V danom modeli uvažujeme s dokonale tuhú krabičkou (box), ktorá je naplnená nestlačeným vlákenným materiálom o objemu V_{vl} . Rozmer pôdorysu je $a \times b$ s počiatočnou výškou c_0 a zaplnením μ_0 , ktoré je dané vzťahom:

$$\mu_0 = \frac{V_{vl}}{V_c} = \frac{V_{vl}}{abc_0}. \quad (10)$$

Pôsobením tlaku p na vlákenný materiál v krabičke sa mení výška c_0 na výšku c a zaplnenie μ_0 na zaplnenie μ . Pôdorys zostáva nemenný.

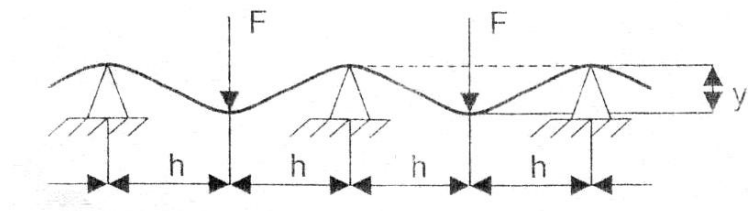
$$\mu = \frac{V_{vl}}{V_c} = \frac{V_{vl}}{abc}. \quad (11)$$



Obr. č. 3: Tuhá krabička s vlákenným materiálom a) pred pôsobením tlaku, b) po pôsobení tlaku. Čerpané z [22].

Teória van Wyka obsahovala radu zjednodušujúcich predpokladov. Jedným z najdôležitejších je:

1. Stlačovanie spôsobuje iba ohybové deformácie vlákien. Van Wyk si vlákno predstavoval ako nekonečný nosník s pravidelne rozmiestnenými podporami vo vzdialenosti $2h$ a pravidelne zaťaženého silami F . Príkladom je nosník na obr. č. 4



Obr. č. 4: Nosič s pravidelne rozmiestnenými podperami.

Za pomoci technickej mechaniky bolo možné nájsť vzťah medzi pôsobiacou silou F a priehybom y .

$$F = k_F \frac{y}{h^3}, \quad (12)$$

kde parameter k_F je závislý na Youngovom modulu pružnosti a deformácie prierezu nosníku. Pre výpočet dĺžky ohybovej čiary δ platí vzťah:

$$\delta = hf\left(\frac{y}{h}\right), \quad (13)$$

kde f je monotónne rastúca funkcia závislá Youngovom modulu pružnosti a deformácie prierezu nosníku.

2. Pre vlákna majúce tvar pravidelne zaťažených nosníkov v stlačnom vlákennom útvare platia rovnice odvodené z klasickej mechaniky.

3. Dĺžka ohybovej čiary δ medzi podperou a silou F v nosníku je chápaná ako stredná dĺžka vlákna medzi susednými kontaktmi $\bar{\delta}$.

4. Hustota pravdepodobnosti smerového usporiadania vlákien w a parameteru materiálu k_δ sa pri stlačovaní vlákenného materiálu nemenia.

5. V procese stlačovania sa nemení objem ani dĺžka vlákien [20].

Pre vlastné vyjadrenie závislosti tlaku na zaplnení bol vytvorený vzťah

$$p = k_p \mu^3, \quad (14)$$

kde k_p je súhrny parameter vlákenného materiálu. V počiatočnom stave deformácie, keď je $\mu = \mu_0$ nabýva malé hodnoty tlaku $p_0 = k_p \mu_0^3 > 0$. V skutočnosti je zaplnenie i pri nulovom tlaku väčšie od nuly. Tuto skutočnosť prisudzujeme mnohým zjednodušujúcim predpokladom. Preto van Wyk navrhol empirickú korekciu rovnice (14) nasledovne:

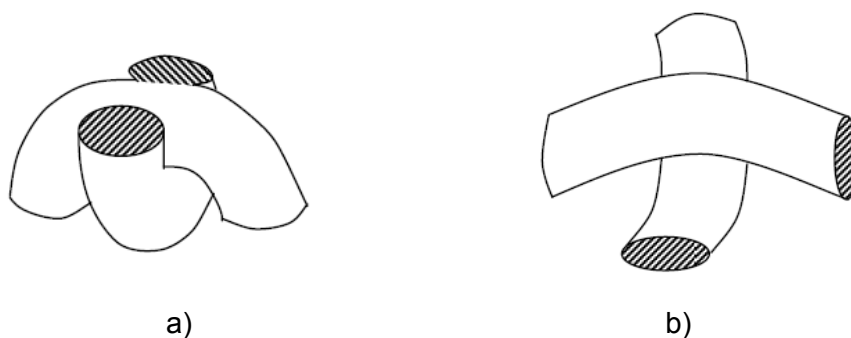
$$p = k_p (\mu^3 - \mu_0^3), \quad (15)$$

alebo

$$p = k_p (\mu - \mu_0)^3. \quad (16)$$

Výrazy (15) a (16) vyjadrujú podobné hodnoty ako výraz (14), ale ich vzájomná rovnosť je vylúčená.

Tieto výrazy boli prakticky overené mnohými autormi pre malé zaplnenie u rôznych druhov materiálov. Pre vyššie hodnoty zaplnenia $\mu > 0,3$ sa výpočty značne odlišujú od skutočnosti. Pôsobením značne veľkých tlakov dosahovalo zaplnenie hodnôt väčších než 1, čo je v reálu nemožné. Tento problém prisudzujeme zjednodušujúcemu predpokladu, že vlákna sú ideálne rovnomerne rozložené s nulovým objemom. Skutočné vlákna však majú nezanedbateľný objem a v miestach vzájomných kontaktov vlákien vznikajú nestlačiteľné priestory, tzv. **granule** [20].



Obr. č. 5: Vlákenná granula a) pri veľkom zaplnení b) pri malom zaplnení. Čerpané z [22].

V prípade malého zaplnenia vlákenného útvaru vzniká malá sila v mieste kontaktu, vlákna sú k sebe zľahka pritlačované a vzniká granula s pomerne malým objemom (viz obr. č. 5b). V opačnom prípade pri pôsobení vyšších síl a teda pri vyššom zaplnení sú vlákna navzájom tlačené k sebe, čím dochádza k vzniku granuly s väčším objemom (viz obr. č. 5a) [20].

V jednoduchom prípade môžeme vzťah medzi priemerným objemom vlákna v granule w a zaplnením μ vyjadriť lineárnou závislosťou

$$w = k\mu, \quad (17)$$

kde je k konštanta úmernosti, ktorú je možné určiť z teoretického predpokladu najväčšieho možného stlačenia vlákien vo vlákennom útvaru, v ktorom nastáva tzv. medzný stav ($p \rightarrow \infty$). Všetok objem vlákien sa sústreďí v granule a zaplnenie vlákenného útvaru μ sa stáva medzným zaplnením μ_m , pre ktoré približne platí $\mu_m \cong 1$. V skutočnosti dosiahnutie tejto hodnoty nie je možné a preto v praxi sa užíva hodnota medzného zaplnenia $\mu_m = 0,8$. Z týchto predpokladov bol odvodený vzťah závislosti tlaku na zaplnení:

$$p = k_p \frac{\mu^3}{\left(1 - \left[\frac{\mu}{\mu_m}\right]^3\right)^3} - k_p \frac{\mu_0^3}{\left(1 - \left[\frac{\mu_0}{\mu_m}\right]^3\right)^3}, \quad (18)$$

kde k_p je materiálový parameter majúci rozmer 10 – 60 MPa.

Pre malé hodnoty zaplnenia $\mu_0 < \mu \ll \mu_m$ je vzťah (18) veľmi podobný vzťahu (15). Ak platí $\mu \gg \mu_0$ je možné aproximovať rovnicu (14) do tvaru:

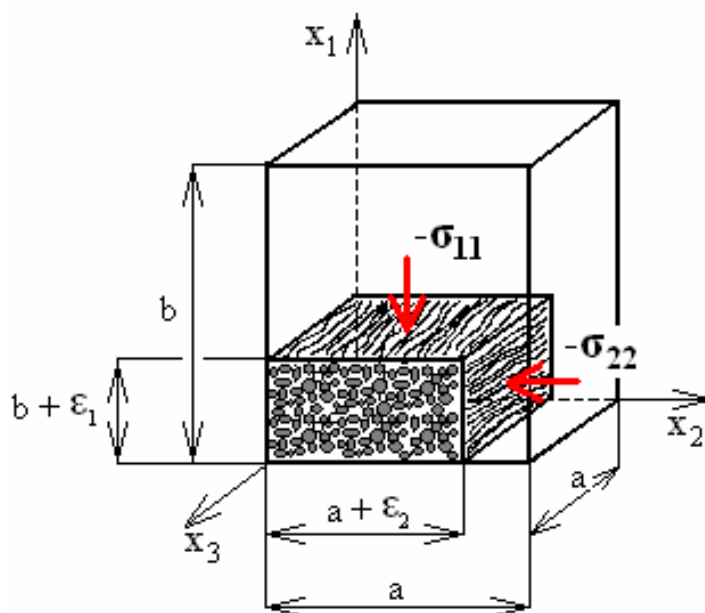
$$p = k_p \frac{\mu^3}{\left(1 - \left[\frac{\mu}{\mu_m}\right]^3\right)^3}. \quad (19)$$

Výše uvedené výrazy boli mnohokrát overované rôznymi autormi. Tieto zavedené matematické formulácie boli založené na zjednodušujúcich predpokladoch,

čiže nebrali v úvahu niektoré podstatné deje, ktoré vo vlákennom materiáli prebiehajú [20, 21].

3.5 Dvojdimenziálna deformácia vlákenného útvaru

Model popisujúci dvojdimenziálnu deformáciu si môžeme predstaviť ako box s rozmermi strán $a \times a \times b$ (viz obr. č. 6). Box je naplnený vlákenným materiálom do výšky b a tento stav považujeme za počiatočný. Deformácia spôsobí zmenu rozmerov vlákenej hmoty v smere os x_1 a x_2 na rozmery $(a + \varepsilon_2)$ a $(b + \varepsilon_1)$. Rozmer v smere osy x_3 zostáva nemenný čiže a . Normálové sily s označením $-\sigma_{11}$, $-\sigma_{22}$ pôsobia na základnú jednotku plochy smerom von z telesa (záporná hodnota vyjadruje tlak). Po zdeformovaní pôsobia tlakové sily $-\sigma_{11}$, $-\sigma_{22}$ na skutočné plochy $b(a + \varepsilon_2)$ a $a(b + \varepsilon_1)$. Touto deformáciou dochádza k vzájomnému ovplyvneniu jednotlivých smerov stlačovania. Čím viac je vlákenný materiál stlačovaný v jednom smere, tým viac bude vynaložená energia na stlačenie v druhom smere [20].



Obr. č. 6: Schéma pôsobiacich tlakov pri dvojdimenziálnej deformácii. Čerpané z [22].

Popisovaný model na obr. č. 6 vychádza z nasledujúcich predpokladov:

- a) (merná) deformačná energia E je funkciou len pomerných predĺžení $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, takže je možné napísať $E = E(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ a elementárny prírastok práce je úmerný elementárnemu prírastku deformačnej energie, teda $dA = CdE$, kde $C \geq 1$ je konštanta úmernosti. Časť vlozenej práce môže byť spotrebovaná trením medzi vláknami a pod.. Elementárny prírastok energie je totálnym diferenciálom funkcie $E = E(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$. Potom platí:

$$dE = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_2} d\varepsilon_2. \quad (20)$$

- b) Vláknenny materiál je transversálne izotropný. Preto vzťah pre deformačnú energiu musí byť symetrický vzhľadom k indexom 1, 2. Teda $E(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = E(\varepsilon_2, \varepsilon_1)$
- c) J. W. S. Hearle a H. M. A. E. El-Behery skúmali pomer Cauchyho napätia $\sigma_{ij} / \sigma_{ii}$ pri jednodimenzionálnej deformácii v smere osi x_i . Taktiež merali tlak pôsobiaci na bočnú stenu nedeformovateľnej krabičky. Tieto experimenty dokázali, že okrem veľmi malých tlakov platí približne:

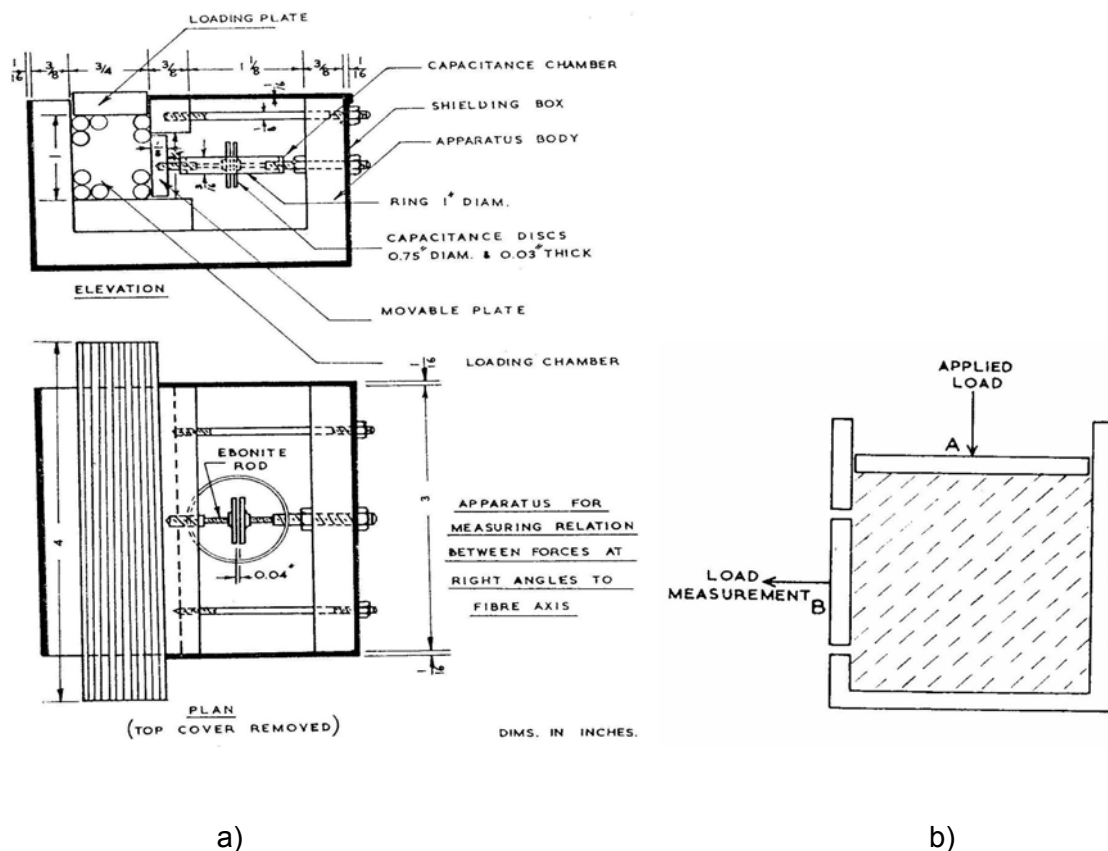
$$\left(\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ii}} \right) \cong konst. \quad (21)$$

3.5.1 Prenos priečných tlakov vo vláknennom útvare podľa J. W. S. Hearle a H. M. A. E. El-Behery

J. W. S. Hearle a H. M. A. E. El-Behery vypracovali štúdiu popisujúcu experimentálne vyšetrenie priečných tlakov uplatňujúcich sa vo zväzku vlákien pod záťažou. Ich predpoklady boli nasledujúce:

- Priechne namáhanie v niektorých miestach priadze je rovnaké vo všetkých smeroch v pravom uhle k ose.
- Vývoj nerovnosti v priečnom tlaku v akomkoľvek bode je predbehnuté pohybom vlákien jedného cez druhé, čiže štruktúra sa chová hydrostaticky v akejkoľvek rovine kolmej k ose vlákna.

Princíp experimentálnej metódy stlačovania a detailná schéma prístroja je zobrazená na obr. č. 7a. Prístroj obsahuje meraciu komoru (viz obr. č. 7b), ktorá je naplnená vlákenným, alebo nevlákenným materiálom. Meracia komora obsahuje dve pohyblivé časti. Jednou je horná pohyblivá doska s označením A, ktorá je zaťažovaná aplikovaným tlakom. Druhá pohyblivá časť označená B sa nachádza na jednej z bočných strán meracej komory. Sila uplatnená bočným tlakom vzorku je meraná zariadením na meranie záťaže.



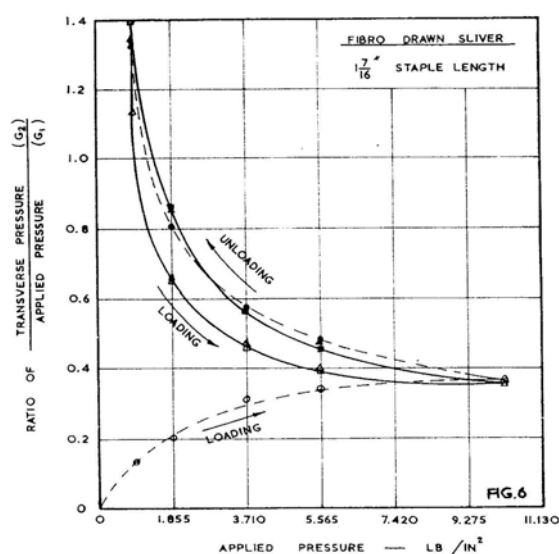
Obr. č. 7: a) Schéma meracieho prístroja na zaznamenávanie prenosu bočných síl.

b) Testovacia komora naplnená vlákenným materiálom. Čerpané z [23].

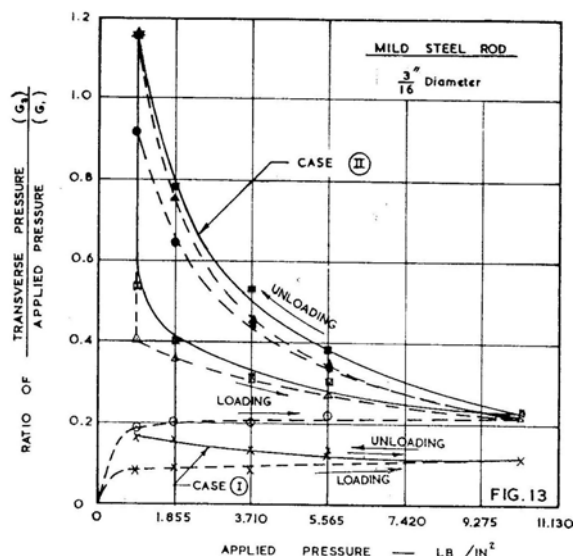
Pre daný experiment zvolili širokú škálu materiálov, aby boli schopný študovať štruktúru a prirodzenosť chovania materiálu pri stlačovaní. Za experimentálny materiál

zvolili bavlnu, bavlnené pramene, hodvábné priadze a monofily rôznych jemností, vysokoťažené medené drôty a oceľové tyče.

Zo získaných výsledkov zistili odlišné chovanie hysterézie s ohľadom na druh materiálu. Popis priebehu stlačovania bavlnených prameňov (viz obr. č. 8a) je nasledujúci. Pri prvej aplikácii zaťaženia sa podiel medzi tlakom preneseným horizontálne (G_2) a vertikálne (G_1) aplikovaným tlakom zvyšuje ku stálej hodnote. Nasledujúcim odľahčením sa podiel tlakov zvyšuje. Pri ďalšom cykle zaťaženia a odľahčenia sa tvorí hysterézná slučka, ktorá sa vyrovnáva vo vyšších hodnotách zaťaženia.



a)



b)

Obr. č. 8: Priebeh stlačovania a) bavlnených prameňov, b) oceľových tyčí.

Pre hrubšie materiály sa podiel tlaku v normálnom smere znižuje. Zaťažujúce a odľahčujúce cykly sa uskutočňovali za rovnakých podmienok pre všetky druhy testovaných materiálov. V prípade oceľových tyčí (viz obr. č. 8b) bolo množstvo tlaku prenesene v kolmom smere približne rovné s Poissonovým pomerom okolo 1/3 pre daný typ materiálu. Kovové vzorky sa obecnne chovali rovnakým spôsobom ako testované textilné vzorky.

Predpokladali, že tlak na pohyblivú dosku je jednotný. V skutočnosti sa bude rôzniť v rozličných hĺbkach, pretože vzniká trenie medzi materiálom a komorou. Tieto výsledky potvrdzujú, že vlákenný útvar zaťažovaný v jednom smere bude prenášať tlak

v kolmom smere. Ukázalo sa, že takéto chovanie je komplexne, vykazuje hysteréziu a bude závisieť na parametroch vlákenných útvarov.

Experimenty ukazujú, že pri vysokom zaťažení pomer pričného a aplikovaného tlaku sa stávajú stálymi hodnotami, ktoré sú v rozsahu 0,1 – 0,5. V závislosti k predpokladom Hearla a Sullivana, že pričné tlaky sú rovnaké vo všetkých smeroch je nepodstatné a pomer prenosu síl do kolmej roviny vo vlákennom útvare sa bude pohybovať okolo hodnôt blížiacim sa konštante 0,1 – 0,5.

4. Experimentálna časť

4.1 Cieľ experimentálneho merania

Táto časť diplomovej práce sa zaoberá experimentálnym meraním distribúcie tlaku vo vybraných druhoch vlákenného materiálu (viz tab. č. 1). Skúma ako správne ukladať vlákenný materiál do meracieho zariadenia, aby meranie šírenia tlaku bolo namerané s čo najvyššou presnosťou.

4.2 Návrh experimentu

- Výber vhodného vlákenného materiálu
- Príprava vlákenného materiálu na meranie
- Vhodné zvolenie uloženia vlákenného materiálu do tuhej krabičky
- Meranie distribúcie tlaku
- Interpretácia výsledkov merania a ich porovnanie

4.2.1 Výber a charakteristika materiálu

V dnešnej dobe syntetické materiály tvoria dôležitú a širokú škálu. Syntetický materiál (hmota) je látka v prírode neexistujúca, pripravená chemickou syntézou (odtiaľ termín "syntetický"). Pre meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare boli zvolené vlákenné materiály tohto druhu. Použité vlákna a ich charakteristika je nasledovná:

Polyester (PES)

Polyester si zaslúžil popredné miesto medzi syntetickými vláknami veľkou produkciou až 47,5%. Tvoria veľkú skupinu polymérov, ktorých spoločným znakom je prítomnosť esterových väzieb v hlavnom molekulárnom reťazci, tj. Polymérov obecného vzorca $[-R^1-CO-O-R^2-]$. PES vlákna majú dobrú schopnosť zotavenia, vysokú pružnosť a objemnosť. Dobrú odolnosť voči chemikáliám, ale nie v prípade dlhodobého pôsobenia, s výnimkou silných kyselín a zásad. Medzi záporne vlastnosti

patrí farbenie a tvorenie žmolkov. Teplota tavenia PES je 256°C a tepelná odolnosť PES výrobkov je v rozmedzí 180 – 200 °C [24, 25].

Polypropylén (PP)

Dnešná výroba PP sa podobá výrobe polyetylénu tj. vstrekomím a vyfukovaním na menšie a duté predmety, vytlačovaním na trubky, dosky, profily a výtlačným vyfukovaním na fólie. PP vlákna majú výbornú odolnosť voči chemikáliám, s výnimkou dlhodobého pôsobenia olejov, minimálnu navlhavosť, nižšiu tepelnú odolnosť, nemožnosť povrchového farbenia, nižšiu schopnosť zotavenia po deformácií, nízku odolnosť voči UV žiareniu. Teplota tavenia PP je 170 °C, teplota mäknutia PP je v rozmedzí 145 – 155 °C a tepelná odolnosť výrobkov PP je do 110 °C [24, 25].

Kevlar (PA)

Kevlarové vlákna patria do skupiny para-aromatických polyamidov. Vláknó bolo vyrobené v roku 1965 z poly-p-fenyletereftalamidu. Vplyvom prítomnosti benzénových jadier, ktoré bránia pohyblivosti polymérnych segmentov sú reťazce aramidov tuhé, čo silne obmedzuje ich rozpustnosť a tiež spôsobuje ich netaviteľnosť. Kevlarové vlákna majú vysoký Youngov modul v ťahu a sú stabilné do teploty 150°C. Mechanické vlastnosti týchto vlákien sa znížia približne o 30%, pokiaľ sú vystavené teplote 250 °C po dobu 8 hodín. Medzi ich výhody patrí aj spracovateľnosť bežnými textilnými postupmi. Tieto vlákna sa stali prelomom medzi pancierovými vestami a takmer dokonalou ochrannou vestou [24, 25].

4.2.2 Príprava materiálu

Príprava vlákenného materiálu prebiehala v poloprovoze Katedry netkaných textílií. Pre experiment boli použité vyššie zmieňované syntetické vlákna. Ich základné parametre sú uvedené v tabuľke č. 1. Pre posúdenie vplyvu jemnosti na stlačovanie boli zvolené tri typy polypropylénových vlákien. Vlákná boli poskytnuté katedrou netkaných textílií.

Tab. č. 1: Základné parametre použitých druhov vlákien.

Druh vlákien	Jemnosť vlákien T [dtex]	Merná hmotnosť vlákien ρ [kg/m ³]	Dĺžka vlákien l [mm]
PES	6,7	1360	80
PP	6,7	910	60
	17	910	85
	70	910	90
Kevlar	2,4	1450	40

Vláknenné vrstvy z výše uvedených vlákien boli mechanicky tvorené na valcovom mykacom stroji značky BEFAMA – typu 3K. Jedinú výnimku tvoria PP vlákna o jemnosti 70 dtex, ktoré boli tvorené na valcovom mykacom stroji BEFAMA – typu 3KA. Dôvodom boli technické problémy. Vlákna boli príliš tuhé a mykací stroj ich nedokázal spracovať.

Zo základných vlákenných más boli vytvorené návažky o hmotnostiach: PP 400g, PES 550g a Kevlar 600g. Chumáčky vlákien boli ručne rozvoľnené a ukladané na privádzací pás vstupného ústroja mykacieho stroja. Vlákenná pavučina vystupujúca z mykacieho stroja bola navíjaná na odvádzací valec. Počet jednotlivých vrstiev pavučiny v rúne bol závislý na jemnosti vlákenného materiálu. Po navinutí sa rúno ručne odobralo z navíjacieho valca spôsobom roztrhnutia rúna po šírke z dôvodu zachovania rovnakej dĺžky vlákien vo vlákennom útvare.

Vláknenné rúno sa následne rozstrihalo na päť pásov v smere uloženia vlákien o šírke 10 cm. Šírka týchto pásov je určená rozmerom meracej komory. Priemerná hmotnosť experimentálnych vzorkou a jednoduchá štatistika je uvedená v tabuľke č. 2.

Tab. č. 2: Priemerná hmotnosť a jednoduchá štatistika.

Druh vlákien	Priemerná hmotnosť m [g]	Smerodatná odchýlka s [g]	Variačný koeficient v [%]	Interval spoľahlivosti IS
PES	100,012	0,025	0,025	<99,99; 100,034>
PP 6,7	66,932	0,043	0,064	<66,894; 66,969>
PP 17	66,968	0,078	0,116	<66,899; 67,036>
PP 70	66,909	0,023	0,034	<66,889; 66,929>
Kevlar	106,701	0,154	0,114	<106,566; 106,836>

4.2.3 Meranie distribúcie tlaku

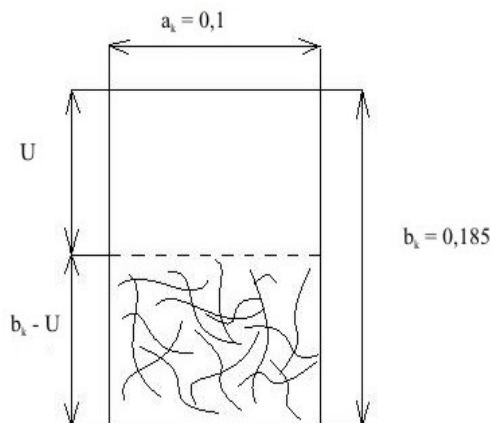
Vlastné meranie prebiehalo na Katedre netkaných textílií v laboratórnych podmienkach. Meranie bolo uskutočňované na testovacom zariadení LabTest 2.050 doplnené o meracie zariadenie na stanovenie redistribúcie tlaku v objemných stlačiteľných materiáloch (viz obr. č. 9).



Obr. č. 9: Meracie zariadenie LabTest 2.050. Čerpané [22].

Základné prevedenie stroja je ovládané za pomoci PC programu LabTest v.3. Tento program umožňuje zaznamenávanie sily v [N] horného piestu a zároveň nazberané dáta vykresľuje do grafu. Pre zaznamenanie pričného signálu je použitý PC program Project 1. Tento program zaznamenáva prenášané signály zo snímačov v jednotkách [mV] a vynáša ich do grafu.

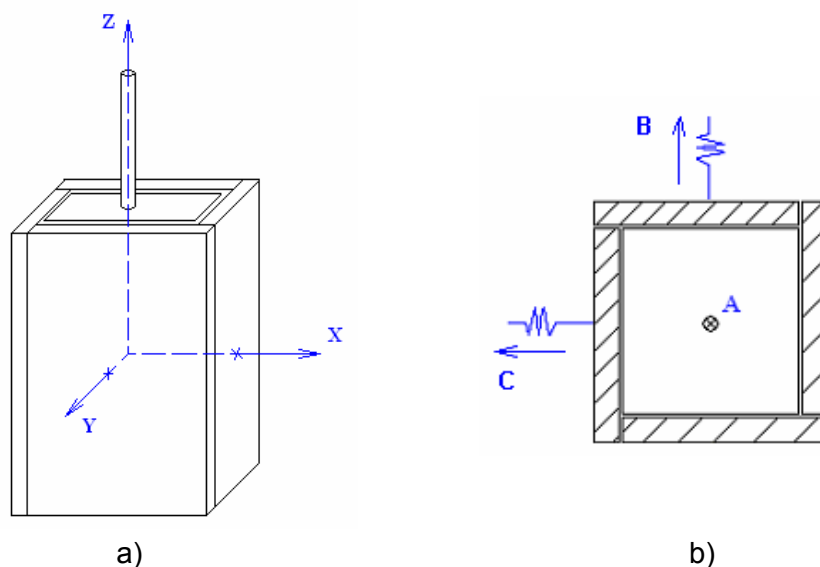
Zariadenie pre meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare má tvar kvádra o vnútorných rozmeroch základne $0,1 \times 0,1$ m a výške $0,185$ m (viz obr. č. 10).



Obr. č. 10: Bočná strana boxu s jeho rozmermi v metroch.

Toto zariadenie sa skladá z dvoch častí:

- Pohyblivej hornej hlavy (ďalej iba piest) upevnenej na posuvný priečnik, s rozmerom strán piestu $a_k = 100$ mm. Piest je pripojený na silomerný snímač pre snímanie vertikálnej sily.
- Pevnej – meracej komory. Na dvoch stranách boxu sú pripojené silomerné snímače B a C (viz obr. č. 11) pre snímanie horizontálnych síl. Pri stlačovaní vlákien piestom v smere osi z , vzniká vo vlákennom útvare napätie, ktoré je prenášané na bočné steny boxu.



Obr. č. 11: a) Zariadenie pre meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare s označením smerových osí x , y , z ., b) Pohľad z hore – zariadenie pre meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare s tenzometrickými snímačmi A, B, C. Čerpané [22].

Zo zaznamenaných hodnôt snímačov A, B a C, za pomoci vhodného prepočtu sa stanovia tlaky P_A , P_B a P_C . Tlak P_A pôsobí na vlákenný materiál v smere osi z a tlaky P_B a P_C pôsobia na steny boxu v smere os x a y (viz obr. č. 11)

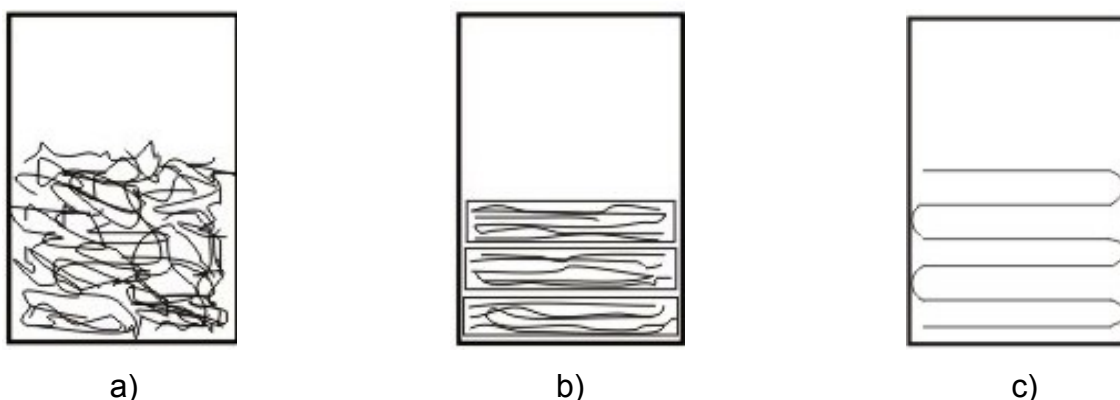
Pred samotným prevedením merania nasledovalo zosúladenie PC programov LabTest v.3 a Project 1 tak, aby perióda zaznamenávania dát bola rovnaká - v tomto prípade každú sekundu. Rýchlosť pohybu horného piestu z počiatočnej polohy bola nastavená na 60 mm/min a kritérium ukončenia skúšky pre 1 vzorku bolo dosiahnutie prítláčnej sily 4900 N.

4.2.4 Uloženie vlákenného materiálu v meracom zariadení

Ako už bolo zmieňované, šírenie tlaku vo vlákenných útvaroch je zložitý proces a dodnes nie z celia preskúmaný, zvlášť šírenie tlaku v priečnom smere. Jedným z obmedzujúcich faktorov procesu je použitie takej formy vkladania vlákenného systému do meracieho zariadenia (komory), aby sa dosiahlo čo najefektívnejších výsledkov. Aj preto je potrebné sa touto problematikou zaoberať.

V tomto prípade bola zvolená metóda postupného vylučovania. Pre prvý experiment boli zvolené nasledujúce varianty vkladania vlákenného systému do meracej komory:

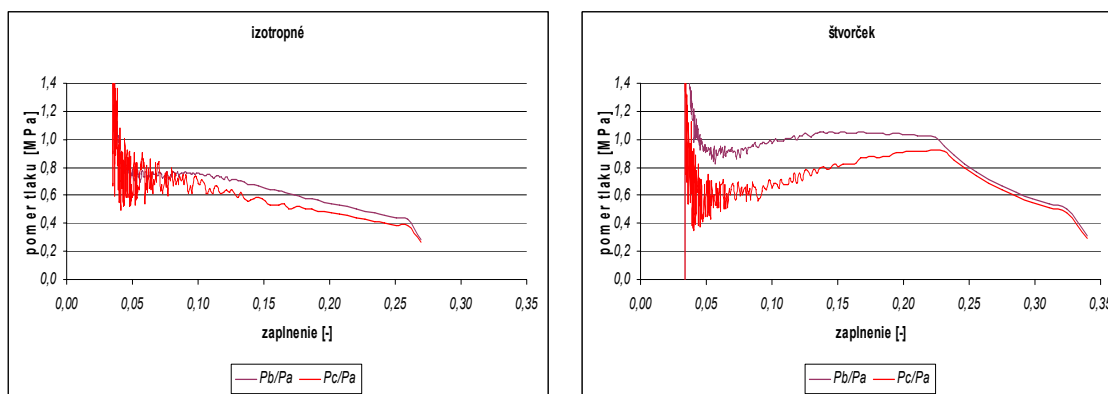
- izotropné - náhodné usporiadanie vo forme chumáčikov (viz. obr. č. 12a)
- anizotropné - cielené usporiadanie vlákien (viz. obr. č. 12b, 12c)



Obr. č. 12 : Uloženie vlákien v meracej komore: a) izotropné b) anizotropné vo forme natrihaných štvorčekov c) anizotropné, ohýbaním vlákenného útvaru vo forme harmoniky.

Po prvom skúšobnom meraní a spracovaní nameraných hodnôt sa metóda izotropného (viz obr. č. 12a) uloženia vlákien javila ako málo presná pre skúmanie

šírenia tlaku v priečnom smere (viz obr. č. 13a). Pravdepodobným dôvodom je, že natrhane chumáčky vlákien nie je možné rovnomerne uložiť do boxu. Vlákennými nie sú dostatočne vyplnené rohy boxu a vlákenný materiál sa sústreďuje najmä v jeho strede. (Pravdepodobne pre meranie distribúcie tlaku pre izotropné uloženie vlákien je potreba zvoliť inú formu meracej komory ako je napr.: valcový tvar.) Preto táto varianta bola vylúčená.



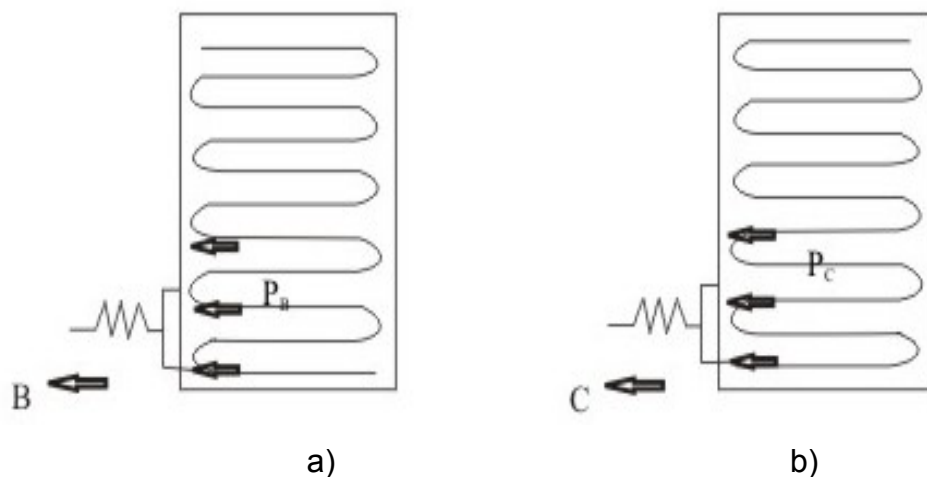
a)

b)

Obr. č. 13: Chovanie vlákenného materiálu pri aplikácii tlaku: a) izotropné (chumáčky) b) anizotropné (štvorčeky).

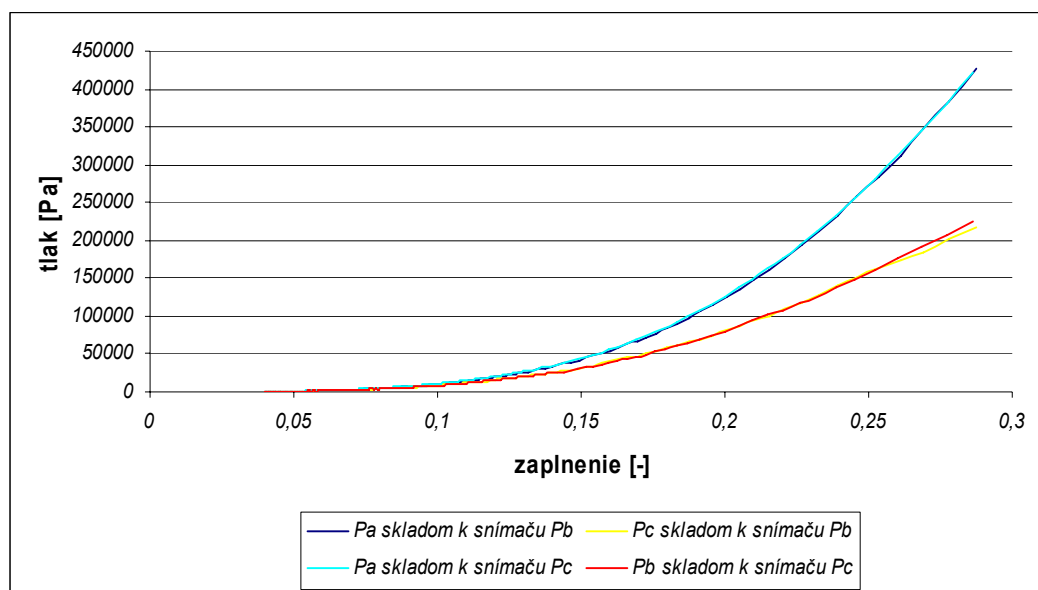
Nasledujúca varianta (viz obr. č. 12b) je vkladanie vlákenného systému do boxu vo forme nastrihaných štvorčiek o rozmeroch 10 x 10 mm (Rozmery odpovedajú rozmerom meracej komory). Táto metóda sa taktiež prejavila ako nepresná (viz obr. č. 13b). K pravdepodobnému zlyhaniu došlo už pri príprave vzorku na meranie. A to pri strihaní vlákenného rúna, kde sa nepodarilo doceliť rovných okrajov štvorčeka. Ďalšou nevýhodou oproti predchádzajúcej variante bolo nezachovanie rovnakej dĺžky vlákien v štvorčeku.

Posledná varianta (viz obr. č. 12c), ktorá bola zvažovaná je uloženie vlákenného materiálu vo forme harmoniky do meracej komory. Táto varianta sa javila ako najpresnejšia z uvádzaných variant. Meraním, ktoré nasledovalo sa rozhodovalo k akému snímaču (B, C) bude vlákenný materiál ukladany ohýbanou stranou harmoniky (viz obr. č. 14). Namerané hodnoty boli spracované a uvedené v grafe 1.



Obr. č. 14: Uloženie vlákennej harmoniky: a) ohybom k snímaču B, b) ohybom k snímaču C.

Graf 1: Krivky horizontálneho a vertikálneho tlaku.



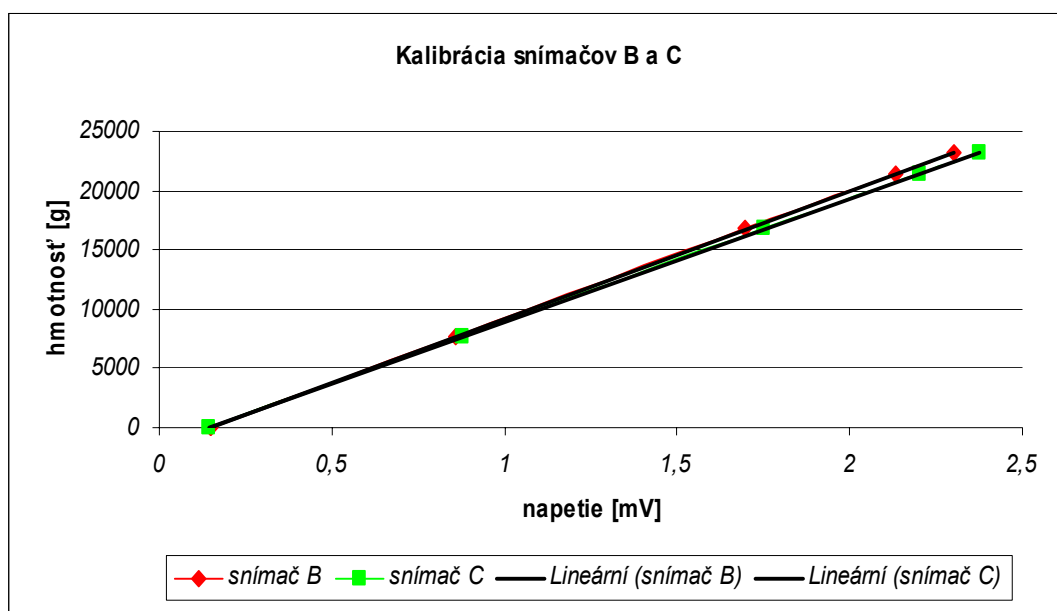
Z grafu je zrejímí pomerne zhodný priebeh kriviek priečných tlakov P_c a P_b . Môžeme teda uvažovať o vkladaní vlákenného materiálu ohýbanou stranou harmoniky k jednému snímaču. Konečným verdiktom pre najuspešnejšie meranie sa stala varianta vyobrazená na obr. 13b. Toto uloženie vlákenného systému je platné pre všetky nasledujúce experimentálne merania.

4.2.5 Kalibrácia tenzometrických snímačov

Pre kvalitné meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare je dosiahnutie správnej kalibrácie meracieho zariadenia. Kalibrácia tenzometrických snímačov prebiehala nasledovne:

Stena meracej komory bola sklopená o 90°. Prvá hodnota napätia je určená vlastnou hmotnosťou silomerného snímača a oceľovej dosky. Druhý prírastok je určený pridaním referenčného závažia o hmotnosti 7660g a opäť je zistená hodnota napätia. Rovnakým spôsobom sa zisťovala hodnota napätia pre zaťaženie závažím o hmotnosti 16776g, 21435g a 23270g. Tieto hodnoty určujú strmosť nárastu napätia v závislosti na hmotnosti záťaže (viz graf 2.). Týmto spôsobom boli nakalibrované tenzometrické snímače B a C.

Graf 2: Strmosť nárastu napätia v závislosti na hmotnosti záťaže.



4.2.6 Prepočet elektrického napätia na hodnoty síl a tlaku

Hodnoty napätia $U_{B,C}$ [mV] meraných vzorkou vychádzali z tenzometrických snímačov B, C. Podľa vzťahu (22) boli hodnoty napätí prepočítane na sily $F_{B,C}$ v [N].

$$F_{B,C} = k_{B,C} U_{B,C}, \quad (22)$$

kde $k_{B,C}$ je kalibračná konštanta uvažovaného tenzometrického snímača.

Následne hodnoty síl F_A , F_B , a F_C boli prepočítané na hodnoty tlakov P_A , P_B a P_C podľa vzťahov (23), (24) a (25).

Tlak P_A [Pa] je tlak pohyblivého horného piestu meracieho zariadenia, ktorý pôsobí na vlákenny materiál. Získame ho zo vzťahu:

$$P_A = \frac{F_A}{S} = \frac{F_A}{0,1^2}, \quad (23)$$

kde F_A je sila pôsobiaca na vlákenny materiál v [N] a S je plocha zaťažovacieho piestu meracieho zariadenia v [m²].

Tlak P_B je tlakom pôsobiacim na bočnú stenu meracieho zariadenia, ktorý je získaný podľa vzťahu:

$$P_B = \frac{F_B}{(b_k - U)0,1} \quad (24)$$

kde F_B je sila pôsobiaca na bočnú stenu boxu v [N], b_k je pôvodná výška boxu ($b_k = 0,185\text{m}$) v [m] a U je hodnota posuvu piestu zo základnej polohy v [m].

Tlak P_C je tlakom pôsobiacim na bočnú stenu meracieho zariadenia, ktorý je získaný podľa vzťahu:

$$P_C = \frac{F_C}{(b_k - U)0,1}, \quad (25)$$

kde F_C je sila pôsobiaca na bočnú stenu boxu v [N], b_k je pôvodná výška boxu ($b_k = 0,185\text{m}$) v [m] a U je hodnota posuvu piestu zo základnej polohy v [m].

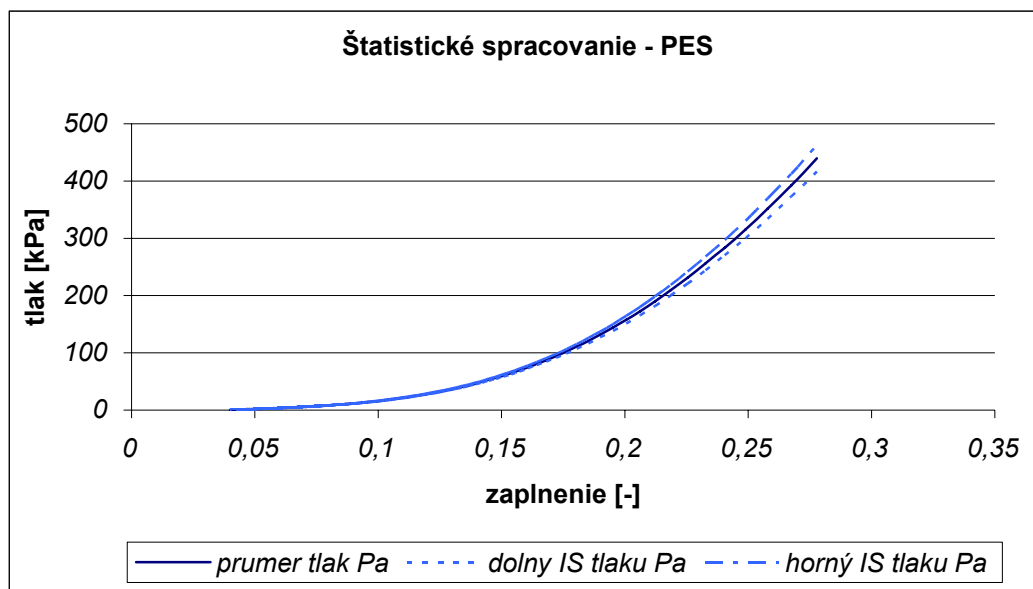
5. Výsledky merania

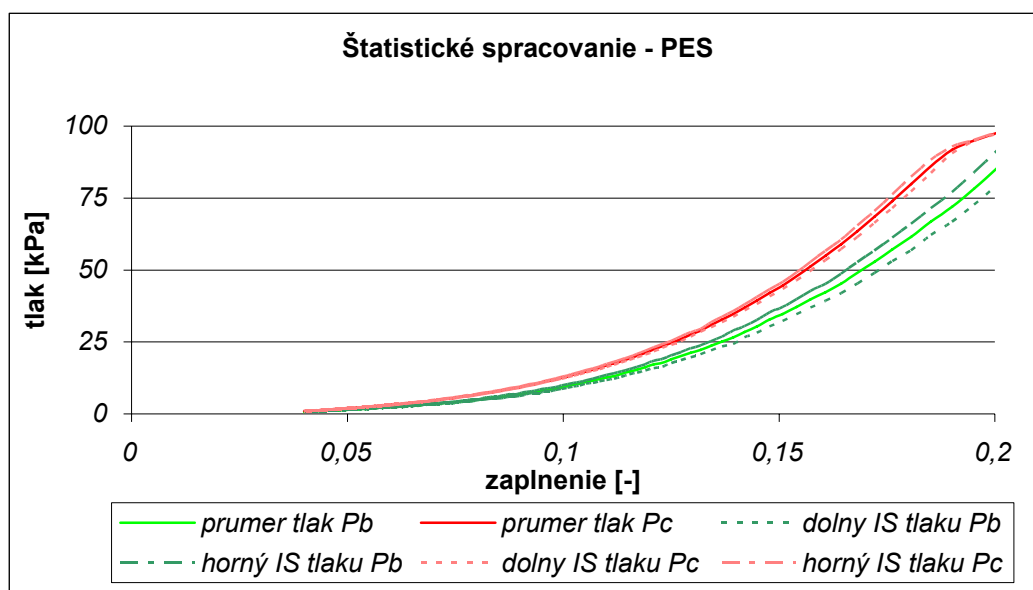
5.1 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt

Ako už bolo uvedené, meranie šírenia tlaku vo vlákennom útvare sa prevádzalo na piatich typoch vlákenného materiálu. Pre overenie presnosti meracej metódy bolo nutné namerané výsledky štatisticky spracovať. Každý materiál bol premeraný celkom päťkrát pri uložení vlákenného materiálu v meracej komore v tvare harmoniky skladanou hranou k snímaču C. Z týchto piatich meraní bola stanovená priemerná krivka a k nej 95% interval spoľahlivosti (IS).

Graf 3 zobrazuje priemernú krivku PES v závislosti zaplnenia na vertikálnom tlaku Pa. K priemernej krivke je zostrojený príslušný horný a dolný interval spoľahlivosti. V grafe 4 sú uvedené priemerné krivky priečných tlakov Pb, Pc a k nim príslušné intervaly spoľahlivosti. Ako je vidieť z grafov IS pre vertikálny tlak Pa sú pomerne úzke, pre horizontálne tlaky Pb, Pc sa IS zväčšujú približne od hodnoty zaplnenia $\mu > 0,15$. Grafy 5 - 12 popisujúce priemerné krivky tlakov PP 6,7, PP 17, PP 70, kevlaru a im príslušné intervaly spoľahlivosti sú uvedené v prílohe I.

Graf 3: Priemerná krivka Pa a interval spoľahlivosti PES o jemnosti 6,7 dtex.



Graf 4: Priemerná krivka P_b , P_c a intervaly spoľahlivosti PES o jemnosti 6,7 dtex.

5.2 Komparácia vzťahu (14) C. M. van Wyka s experimentálnymi hodnotami

Táto kapitola je venovaná overeniu teoretického modelu pre výpočet závislosti tlaku na zaplnení. Pre tento výpočet je použitý základný vzťah (14) podľa C. M. van Wyka.

$$p = k_p \mu^3, \quad (14)$$

ktorý je upravený nasledovne:

$$p = k_p \mu^a. \quad (26)$$

Vzťah (26) obsahuje súhrny parameter k_p a exponent zaplnenia a , o ktorých predpokladáme, že sú konštantné pre použitý vlákenný materiál, ktorého usporiadanie a tvar vlákien je približne rovnaký. Snahou je nájsť takú metódu, aby bolo možné čo najpresnejšie odhadnúť hodnoty parametrov k_p a a . Z tohto dôvodu bola zvolená metóda linearizovanej regresie. Najprv je vzťah (26) linearizovaný jednoduchou matematickou operáciou. Potom linearizovaná forma rovnice nadobúda tvar:

$$\ln p = \ln k_p + a \ln \mu \quad (27)$$

Aby bolo možné urobiť lineárnu regresiu je nutné upraviť namerané hodnoty tlaku p na $\ln p$ a vypočítané hodnoty μ na $\ln \mu$. Takto upravené hodnoty údajov už vieme podrobiť lineárnej regresii, čiže tieto údaje opíšeme rovnicou priamky:

$$y = b + ax, \quad (28)$$

kde potom zo smernice vieme vypočítať exponent zaplnenia a z úseku parameter k_p . Pre výpočet lineárnej regresie bol použitý PC program Excel. Po prevedených úpravách bol získaný výraz pre výpočet parametru k_p :

$$k_p = e^{\ln k}, \quad (29)$$

a výraz pre výpočet exponentu zaplnenia a :

$$a = \left[e^{\ln \mu} \right]^a \quad (30)$$

Pre výpočet parametru k_p a exponentu zaplnenia a pomeru tlakov bolo vychádzané z nasledujúceho vzťahu:

$$p = \frac{P_b}{P_a} = \frac{k_{Pb}}{k_{Pa}} \mu^{(a_{Pa}=a_{Pa})} \quad (31)$$

V tabuľke č.3 sú uvedené hodnoty parametrov k_p a a stanovené pomocou linearizovanej regresie pre jednotlivé druhy vlákenného materiálu.

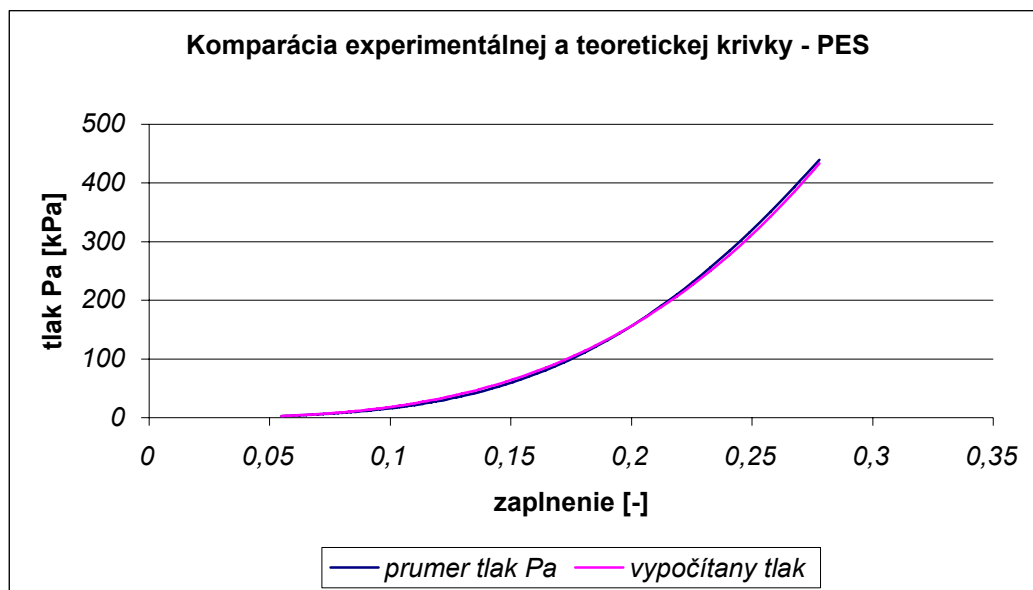
Tab. č. 3: Hodnoty k_p a a pre jednotlivé teoretické krivky jednotlivých vlákenných materiálov.

Druh vlákien	tlak Pa [kPa]		tlak Pb [kPa]		pomer tlakov Pb/Pa [-]	
	konštanta k_p	exponent a	konštanta k_p	exponent a	konštanta k_p	exponent a
PES	22948	3,13	8770	2,94	0,382	- 0,19
PP 6,7	11480	3,16	3173	2,92	0,276	- 0,24
PP 17	31571	3,49	11211	3,5	0,355	0,01
PP 70	13105	2,82	10581	2,87	0,807	0,05
Kevlar	236333	3,13	56500	3,51	0,239	0,38

5.2.1 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek tlaku Pa

V nasledujúcich grafoch 13 – 17 sú porovnávané experimentálne namerané hodnoty vertikálnych tlakov Pa s hodnotami vypočítanými podľa vzťahu (26) za použitia konštánt k_p a exponentu zaplnenia a z tabuľky č. 3.

Graf 13: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pa PES 6,7 dtex.



Diskusia:

Z grafického znázornenia priebehu kriviek závislosti zaplnenia μ na tlaku Pa uvedeného v grafoch 13 – 17 vyplýva, že teoretické (ružová krivka) a experimentálne (modrá krivka) krivky sa od seba príliš nelíšia a vykazujú rastúcu tendenciu. V prípade experimentálnych kriviek PP 17 a PES sú takmer kopírovane teoretickými krivkami. Pre PP 6,7 a PP 70 narastá malý rozdiel v priebehu kriviek približne od zaplnenia $\mu > 0,23$ a u kevlarových vlákien nastáva rovnaká situácia od zaplnenia $\mu > 0,15$.

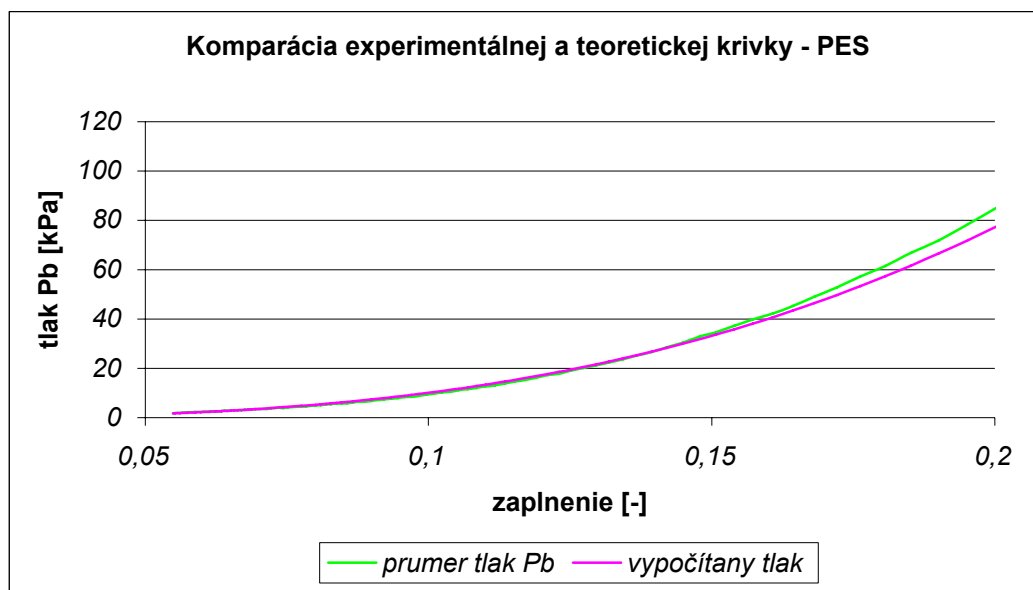
Podľa jednoduchých predpokladov zavedenými C. M. van Wykom môže zaplnenie dosahovať hodnoty 1. V realite je dosiahnutie takéhoto zaplnenia vo vláknennom systéme nemožné. V prípade tohto experimentu boli dosiahnuté maximálne hodnoty zaplnenia pre: PES 6,7 $\mu = 0,278$, PP 6,7 $\mu = 0,347$, PP 17 $\mu = 0,301$, PP 70 $\mu = 0,284$ a kevlar $\mu = 0,182$. Tieto hodnoty zaplnenia sú pomerne nízke a bolo by zaujímavé sledovať priebehy kriviek pri vyššom zaťažení, ktorého nebolo možné doceliť v tomto experimente. Dôvodom bolo technické prevedenie prístroja, kde maximálne zaťaženie dosahovalo 4900 N.

Vypočítané hodnoty exponentu zaplnenia a sa pohybujú okolo hodnoty 3. A tým pádom odpovedajú hodnote exponentu zaplnenia vyjadreného vo vzťahu (14) C. M. van Wyka.

5.2.2 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek tlaku Pb

V grafoch 18 – 22 sú porovnávané experimentálne namerané hodnoty horizontálnych tlakov Pb s hodnotami vypočítanými podľa vzťahu (26) za použitia konštant k_p a exponentu zaplnenia a z tabuľky č. 3. V týchto grafoch sa pohybujeme do maximálnej hodnoty zaplnenie $\mu = 0,2$. Vo vyšších hodnotách zaplnenia vznikali anomálie v priebehu experimentálnych kriviek. Dochádzalo tam k zvláštnemu lomeniu kriviek, ktoré bolo pravdepodobne spôsobené nedokonalosťou meracieho prístroja a tým pádom namerané hodnoty neboli dostatočne spoľahlivé.

Graf 18: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pb PES 6,7 dtex.



Diskusia:

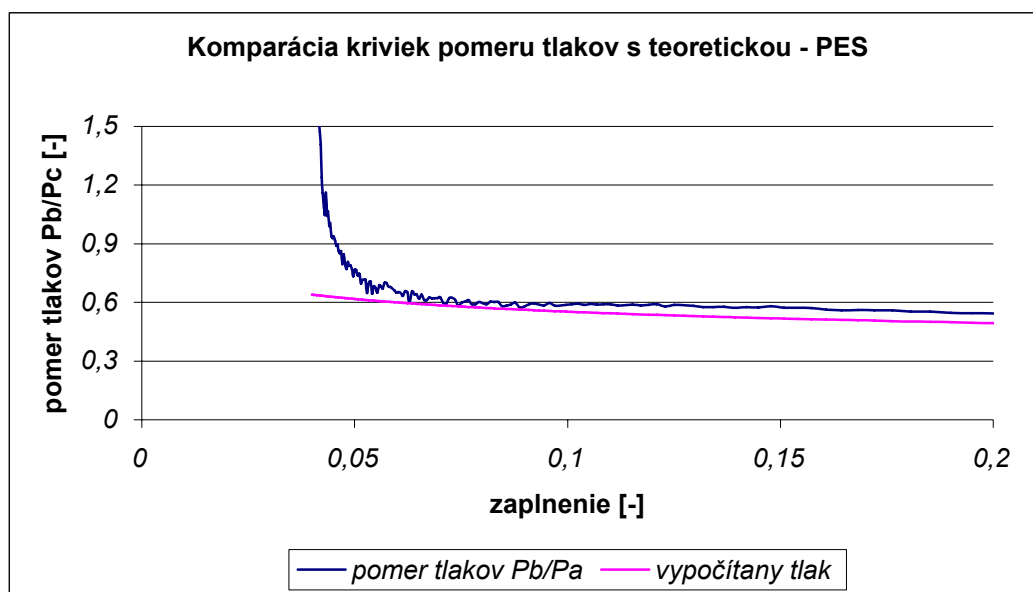
V grafickom prevedení závislosti zaplnenia na tlaku sledujeme priebeh teoretickej (ružová krivka) a experimentálnej (zelená krivka) krivky Pb. Z grafov je zreteľné, že experimentálne a teoretické krivky v rozsahu zaplnenia $\mu < 0,55; 0,2 >$ dosahujú rovnakého priebehu. Výnimku tvorí PP 70, kde sa experimentálna krivka

začína odchyľovať od teoretickej v hodnote zaplnenia $\mu = 0,18$ a PES v hodnote zaplnenia $\mu = 0,16$.

5.2.3 Komparácia experimentálnych a teoretických kriviek pomeru tlakov P_b/P_a

Grafy 23 – 27 uvádzajú krivky pomeru tlakov P_b/P_a a hodnoty vypočítané podľa vzťahu (31) za použitia konštant k_p a exponentu a z tabuľky č. 3.

Graf 23: Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej PES 6,7 dtex



Diskusia:

V prípade grafov 23 – 27 sledujeme pomer horizontálneho tlaku P_b (modrá krivka) a vertikálneho tlaku P_a (ružová krivka). Priebeh kriviek uvedených pomerov tlakov je v začiatku zreteľne nestály, ale postupne sa ušľahuje k stálej hodnote. Experimentálne krivky sú porovnávané z vypočítanými. Vo všetkých prípadoch vypočítané krivky vykazujú pomerne rovnaký priebeh s experimentálnymi krivkami v ustálených hodnotách. Výnimkou je polypropylén s jemnosťou 70 dtex, ktorého sa

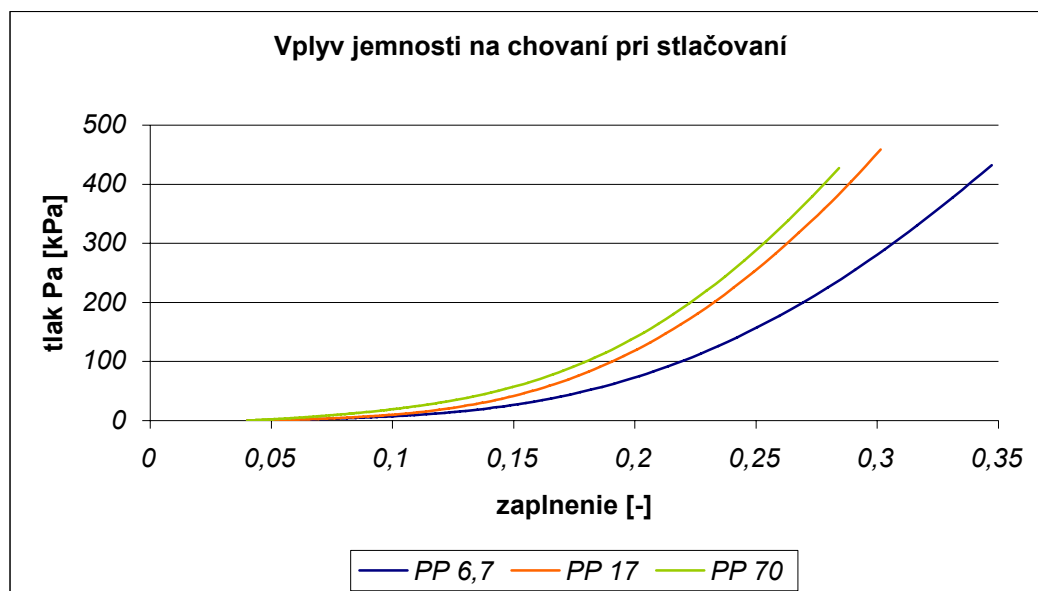
experimentálna krivka približne v hodnote zaplnenia $\mu = 0,08$ začína výraznejšie odchyľovať od vypočítanej.

Z hľadiska porovnania ideí J. W. S. Hearla uvedenej v kap. 3.5.1, kde jeho experiment ukázal, že pri vysokom zaťažení pomer priečného a aplikovaného tlaku dosahuje stálych hodnôt v rozsahu 0,1 – 0,5 sa nám táto idea potvrdzuje. Výnimkou je PES o jemnosti 6,7 dtex, kde pomer tlakov dosahuje ustálených hodnôt okolo 0,6 a PP o jemnosti 70 dtex dosahuje pomerne ustálených hodnôt okolo 0,7.

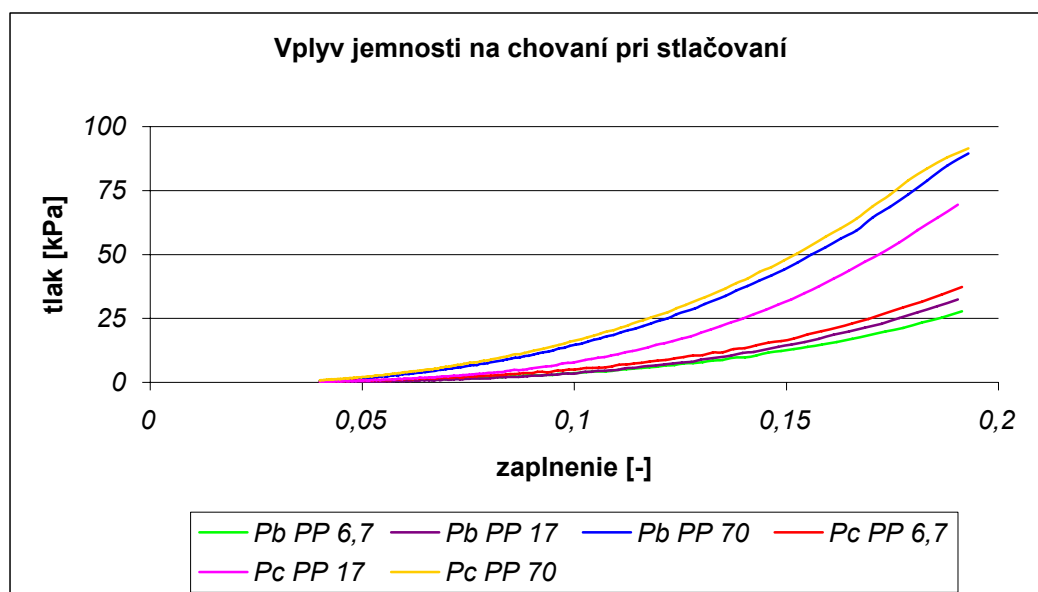
5.3 Vplyv jemnosti vlákien na chovaní materiálu pri stlačovaní

V prípade grafov 28 a 29 je uvedené ako jemnosť vlákien ovplyvňuje chovanie vlákenného materiálu pri stlačovaní. Tieto grafy znázorňujú priemerné krivky tlakov P_a , P_b a P_c v závislosti na zaplnení pre PP o troch rozdielnych jemnostiach ktoré sú uvedené v tab. č. 1.

Graf 28: Deformačné krivky PP vlákien pri pôsobení tlaku P_a



Graf 29: Deformačné krivky PP vlákien v horizontálnom smere.



Diskusia:

Porovnaním experimentálne dosiahnutých kriviek (viz graf 28) polypropylénu o troch rozdielnych jemnostiach v závislosti zaplnenia μ na tlaku Pa pri rovnakej priemernej hmotnosti 66,9g sa výrazne odlišujú. PP o jemnosti 6,7 dtex dosahuje vyšších hodnôt zaplnenia ako PP s vyššou tuhosťou (jemnosťou). Napríklad pre docielenie rovnakého zaplnenia $\mu = 0,25$ je nutné vynaložiť rozdielny tlak a to pre PP 6,7 = 157,95 kPa, PP 17 = 252,04 kPa, PP 70 = 302,65 kPa. Z tohto príkladu vyplýva, čím je materiál hrubší, tým sa zvyšuje hodnota tlaku pre dosiahnutie rovnakého zaplnenia.

V grafe 29 sú uvedené priebehy experimentálnych kriviek horizontálnych tlakov Pb a Pc polypropylénu s tromi odlišnými jemnosťami. Sledujeme odlišné šírenie tlaku v priečných smeroch v závislosti na jemnosti vlákenného materiálu. Bočné tlaky dosahujú pomerne nízkych hodnôt v porovnaní s tlakom vertikálnym Pa. Jemnejší vlákenný materiál vykazuje nižšie hodnoty tlaku ako materiál s vyššou tuhosťou (jemnosťou). Taktiež je vidieť rozdielne chovanie priebehu kriviek tlaku Pb a Pc, kde krivky Pb nadobúdajú pomerne nižších hodnôt ako krivky Pc. Toto chovanie je vysvetliteľné uložením vlákenného systému v meracom zariadení. Číže skladaná strana vlákenného materiálu vynakladá väčší tlak (Pc) na stenu meracieho zariadenia.

6. Záver

Predmetom tejto diplomovej práce bolo skúmanie distribúcie tlaku vo vlákenných systémoch a sledovanie prenosu síl do kolmej roviny pri aplikácii zaťaženia. Aby bolo možné študovať a porovnať pôsobenie tlaku vo vlákennom útvaru, pre experiment boli zvolené syntetické vlákenné materiály, odlišujúce sa druhom a jemnosťou.

Podstata experimentálneho merania spočívala v jednoosom stlačovaní vlákenných útvarov v špeciálnej meracej komore, ktorá bola upevnená na trhacom stroji LabTest 2.050. Pre skúmanie pôsobenia tlaku v priečnom smere bola meracia komora vybavená silomernými snímačmi umiestnenými na dvoch stranách tejto komory, ktoré boli schopné zaznamenávať prenos síl. Pre zisťovanie distribúcie tlaku boli zvolené tri druhy vlákenného materiálu: polyester, kevlar, polypropylén o troch jemnostiach a to 6,7 dtex, 17 dtex, 70 dtex.

Experimentálne namerané hodnoty boli spracované vhodným výberom matematických a štatistických operácií a následne overené s teoretickým modelom podľa C. M. van Wyka. V tomto prípade tu figuruje materiálový parameter k_p a exponent zaplnenia a , ktoré boli získané pomocou linearizovanej regresie. Porovnaním experimentálnych hodnôt s vypočítanými v grafickom prevedení bolo zistené, že krivky experimentálne majú tendenciu sa približovať, alebo kopírovať teoretickú krivku. V prípade van Wykovej teórie, že exponent zaplnenia μ je rovné 3 sa potvrdil.

Porovnávaním chovania vlákenného materiálu v závislosti na jemnosti, bol zistený rozmanitý priebeh výsledných kriviek, teda čím bol materiál hrubší, tým bolo nutné aplikovať vyšší tlak pre dosiahnutie rovnakých hodnôt zaplnenia. Pravdepodobnou príčinou je, že vlákna vyšších jemností majú sklon klásť vyšší odpor voči stlačovaniu ako vlákna jemnejšie.

V prípade skúmania šírenia tlaku v priečných smeroch bola hľadaná taká forma vkladania vlákenného materiálu do meracieho zariadenia, aby snímanie tlaku v tomto smere bolo najefektívnejšie a predpokladalo sa že priečne tlaky sú rovnaké vo všetkých smeroch. Konečná forma vkladania vlákenného útvaru do meracieho zariadenia mala tvar harmoniky a ohýbaná strana bola otočená vždy k rovnakému snímaču. V tomto prevedení sa tlaky na bočné strany vzájomne odlišovali. V prípade pomeru tlakov priečného a aplikovaného tlaku sa experimentálne hodnoty v ustálenej hodnote pohybujú okolo hodnoty 0,5, čím sa potvrdzuje predpoklad Hearla a Sullivana,

že pomer prenosu síl do kolmej roviny vo vlákennom útvare sa bude pohybovať okolo hodnôt blížiacim sa konštante 0,1 – 0,5.

Pre budúce štúdie šírenia tlaku vo vlákenných útvaroch by bola zaujímavé sledovať chovanie vlákenného materiálu pri aplikácii vyššieho zaťaženia. Taktiež je potreba zdokonaľiť elektronické prevedenie meracieho prístroja, ktoré by zaistilo kvalitnejšie zaznamenávanie priečnych tlakov.

7. Zoznam použitej literatúry

- [1] van Wyk, C. M.: Note on the Compressibility of wool. *Journal of the Textile Institute*, 37, s. 285 – 292, 1946.
- [2] Matsuo, T.: Study on the Mechanical Property of Fiber Assemblies, (in Japanese). Doctorals thesis, Tokyo Institute of Technology, 1968.
- [3] Stearn, A. E.: The Effect of Anisotropy in the Randomness of Fibre Orientation on Fibre-to-Fibre Contacts, *Journal of the Textile Institute*, 62, s. 353 - 360, 1971.
- [4] Komori, T. - Makishima, K.: Numbers of Fibre-to-Fibre Contacts in General Fiber Assemblies, *Textile Research Journal*, 47, s. 13 – 17, 1977.
- [5] Lee, D. H. – Lee, J. K.: Initial Compressional Behaviour of a Fibre Assembly, in “Objective Measurement: Applications to Product Design and Process Control”, S. Kawabata, R. Postle, a M. Niwa, a iný, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka, s. 613 – 622, 1985.
- [6] Carnaby, G. A. – Pan, N.: Theory of Compression Hysteresis of Fiber Assemblies, *Textile Research Journal*, 59, s. 275 – 284, 1989.
- [7] Lee, D. H. – Carnaby, G. A. – Tandon, S. K.: Compressional Energy of the Random Fiber Assemblies, Part II: Evaluation, *Textile Research Journal*, 62, s. 258 – 265, 1992.
- [8] Pondělková, P.: Deformační závislost při stlačování vlákenných materiálů. [Diplomová práce]. Liberec: 2003 TU Liberec – Fakulta textilní. Vedúci diplomovej práce: Prof. Ing. Peter Ursíny, DrSc.
- [9] Dunlop, J. L.: Characterizing the Compression Properties of Fibre Masses, *Journal of the Textile Institute*, 65, s. 532 - 536, 1974.
- [10] Dunlop, J. L.: Acoustic Emission from Wool During Compression, *Journal of the Textile Institute*, 70, s. 364 - 366, 1979.
- [11] Komori, T. - Itoh, M.: A New Approach to the Theory of the Compression of Fiber Assemblies, *Textile Research Journal*, 61, s. 420 – 428, 1991.
- [12] Komori, T. - Itoh, M.: Theory of the General Deformation of Fibre Assemblies, *Textile Research Journal*, 61, str. 588 – 594, 1991.
- [13] Komori, T. - Itoh, M. – Takaku, A.: Model Analysis of the Compressibility of Fibre Assemblies, *Textile Research Journal*, 62, s. 567 – 574, 1992.
- [14] Baljasov, P. D.: Sžatie tĕkstilnych volokon v mase i tĕchologia tĕkstilnovo proizvodstva. Moskva: Legkaja idustria, 1975.
- [15] Neckář, B.: Vztah mezi stlačováním a zaplněním vlákenných útvarů. *Textil*, roč. 44, č. 10, s. 366 – 370, 1989.

- [16] Dostupné na Internetu: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Tlak>, (cit. 5. 2. 2008).
- [17] Dostupné na Internetu:
http://sk.wikipedia.org/wiki/Silov%C3%A9_nap%C3%A4tie_v_hmote, (cit. 5. 2. 2008).
- [18] Dostupné na Internetu: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Deformace>, (cit. 5. 2. 2008)
- [19] Haňáčková, A.: Stlačování vlákenného materiálu. [Diplomová práce]. Liberec: 2004 TU Liberec – Fakulta textilní. Vedúci diplomovej práce: Prof. Ing. Bohuslav Neckář, DrSc.
- [20] Neckář, B.: Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákenných útvarů. 2.vyd. Liberec: TUL 2001, ISBN 80-7083-473-0.
- [21] Neckář, B.: Compression and Packing Density of Fibrous Assemblies. Textile Research Journal, 67, s. 123 - 126, 1997.
- [22] Pernica, D.: Distribuce tlaku ve vlákenných a pěnových systémech. [Diplomová práce]. Liberec: 2006 TU Liberec – Fakulta netkaných textilií. Vedúci diplomovej práce: Ing. Ondřej Novák.
- [23] Hearle, J. W. S. – El-Behery, H. M. A. E.: The transmission of Transverse Stresses in Fibre Assemblies. Journal of the Textile Institute, 51, s. 164 - 171, 1979.
- [24] Jirsák, O. - Macková I.: Netkané textilie. 3. vyd. Liberec: TUL, 2001, ISBN 80-7083-511-7.
- [25] Militký, J.: Textilní vlákna. 1. vyd. Liberec: TUL 2002, ISBN 80-7083-644-X.

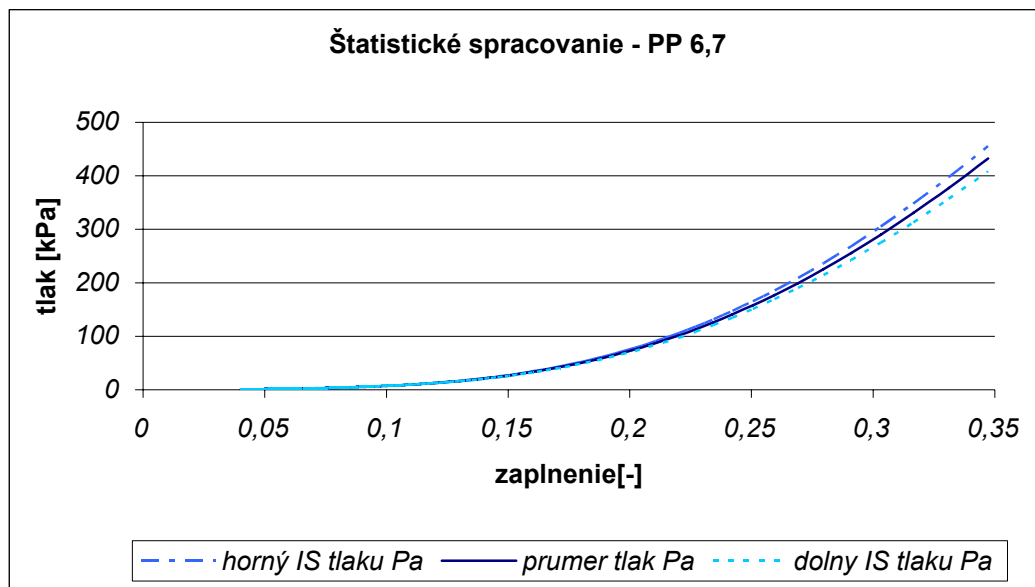
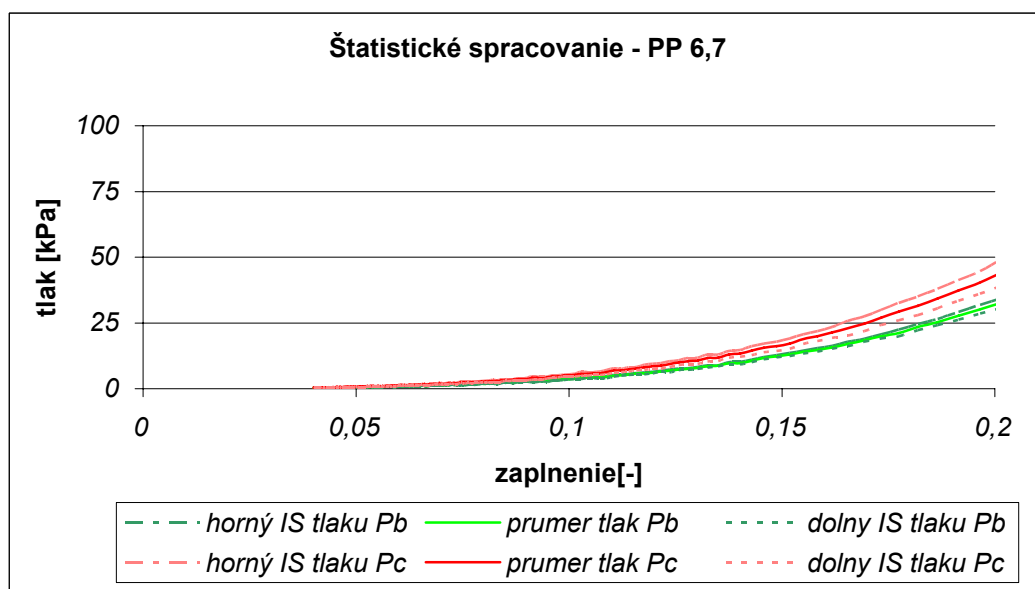
Zoznam príloh

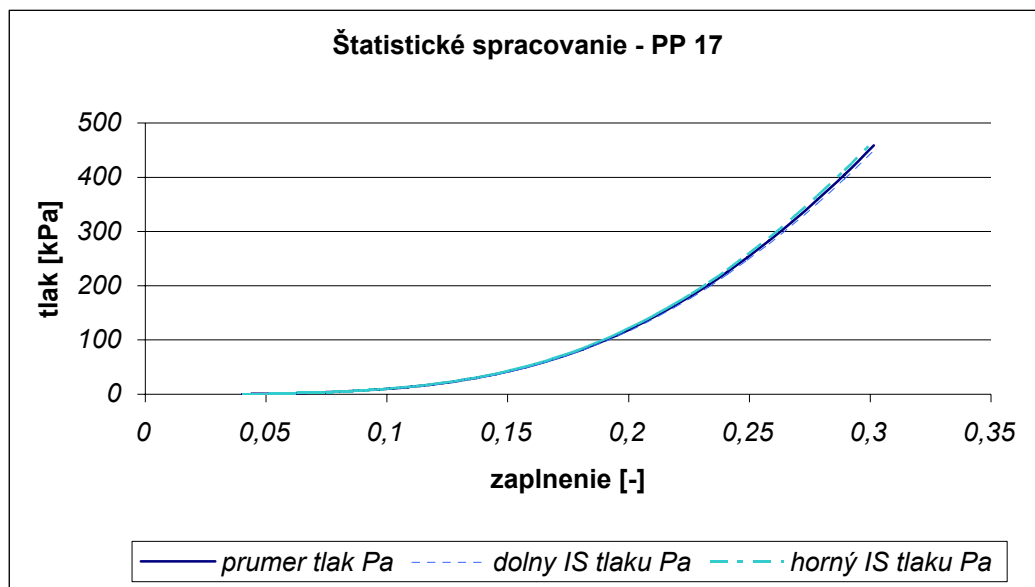
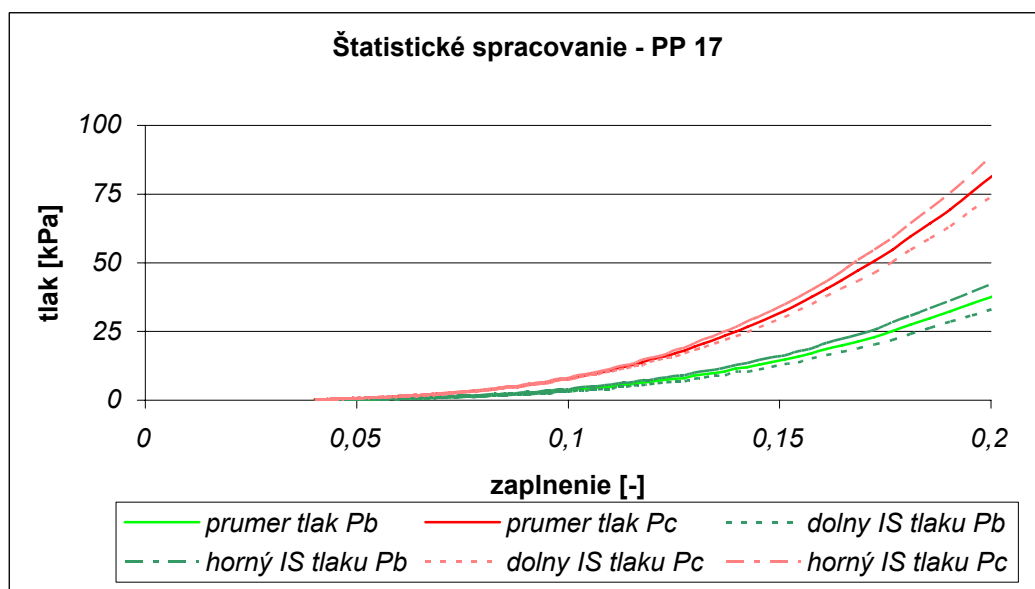
Príloha I. Grafy priemerných kriviek a intervaly spoľahlivosti.

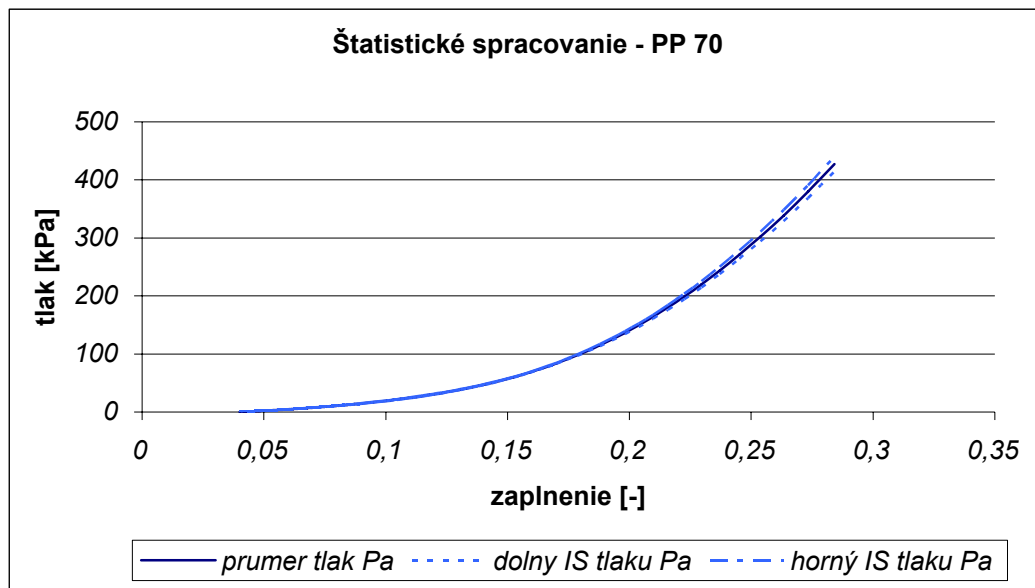
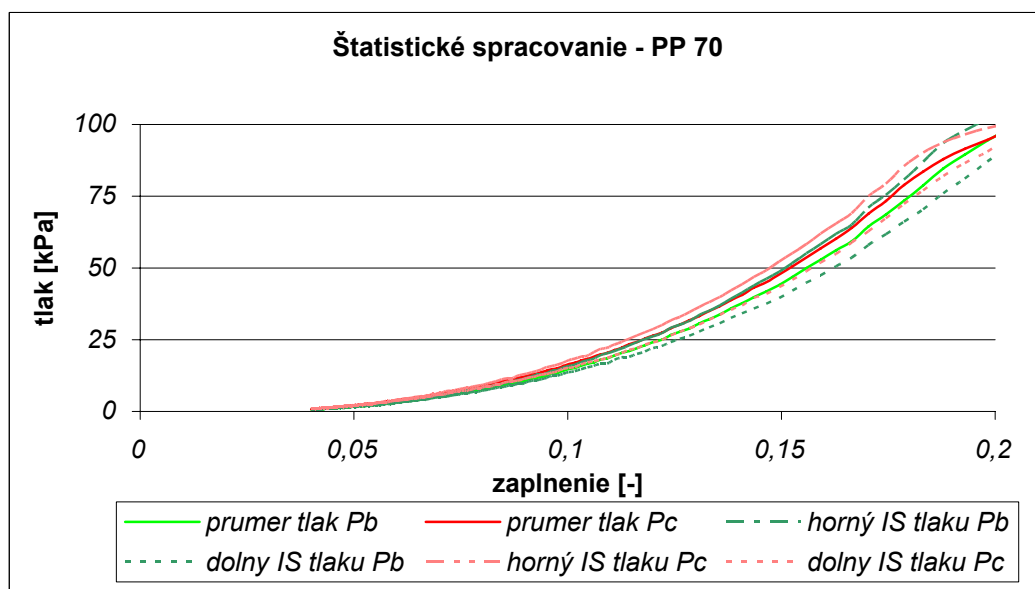
Príloha II. Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku.

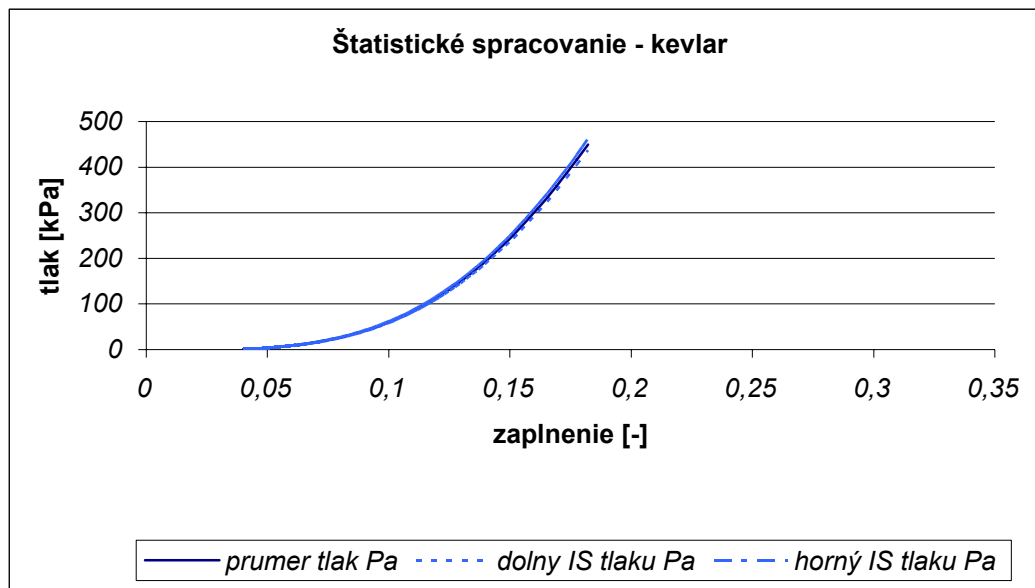
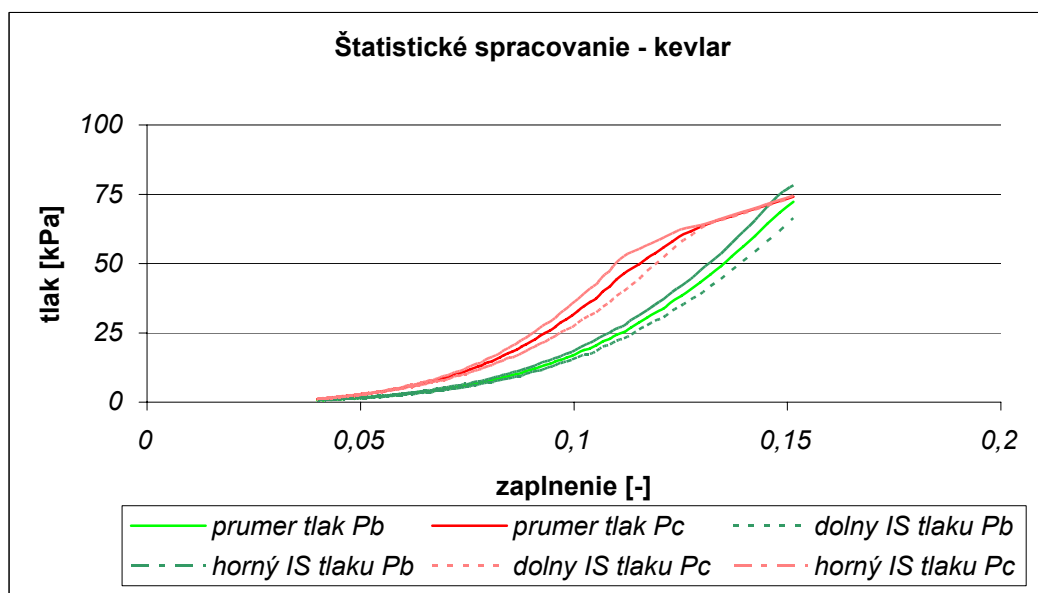
Príloha III. Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej krivky.

Príloha I.

Graf 5: Priemerná krivka P_a a interval spoľahlivosti P o jemnosti 6,7 dtex.Graf 6: Priemerná krivka P_b , P_c a intervaly spoľahlivosti PP o jemnosti 6,7 dtex.

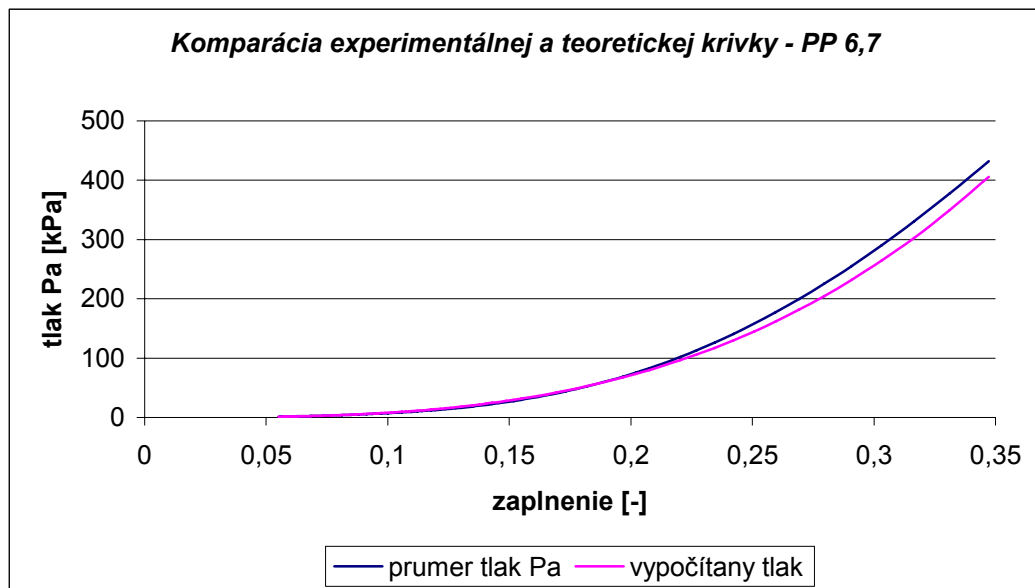
Graf 7: Priemerná krivka P_a a interval spoľahlivosti PP o jemnosti 17 dtex.Graf 8: Priemerná krivka P_b , P_c a intervaly spoľahlivosti PP o jemnosti 17 dtex.

Graf 9: Priemerná krivka P_a a interval spoľahlivosti PP o jemnosti 70 dtex.Graf 10: Priemerná krivka P_b , P_c a intervaly spoľahlivosti PP o jemnosti 70 dtex.

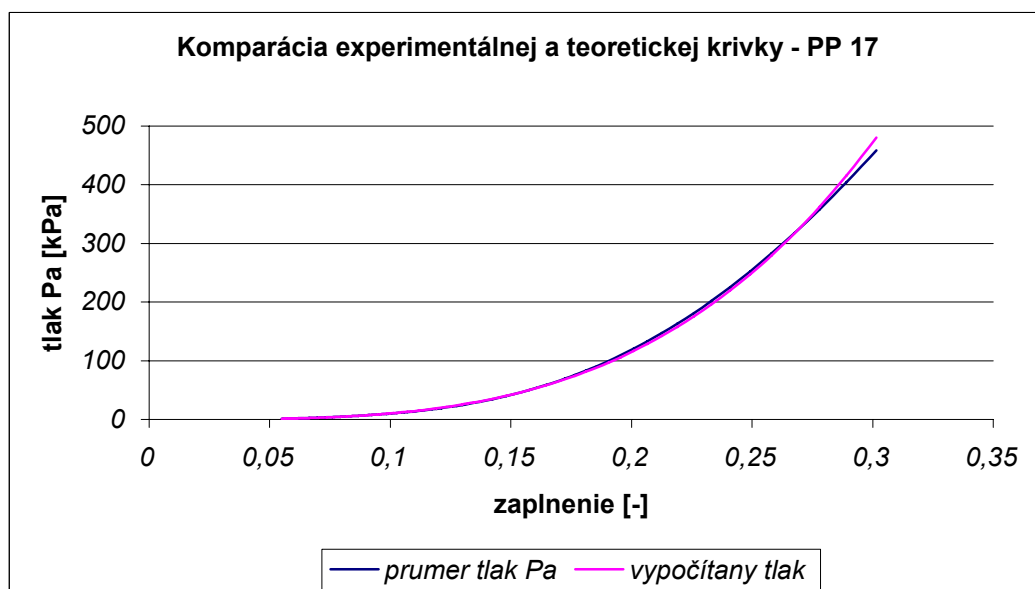
Graf 11: Priemerná krivka P_a a interval spoľahlivosti kevlaru.Graf 12: Priemerná krivka P_b , P_c a intervaly spoľahlivosti kevlaru.

Príloha II.

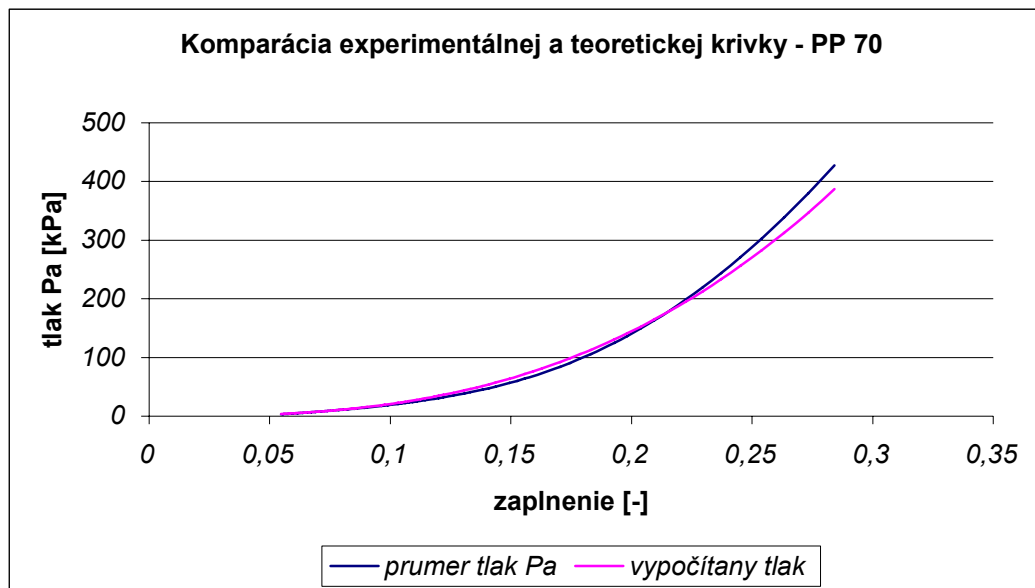
Graf 14: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pa PP 6,7 dtex.



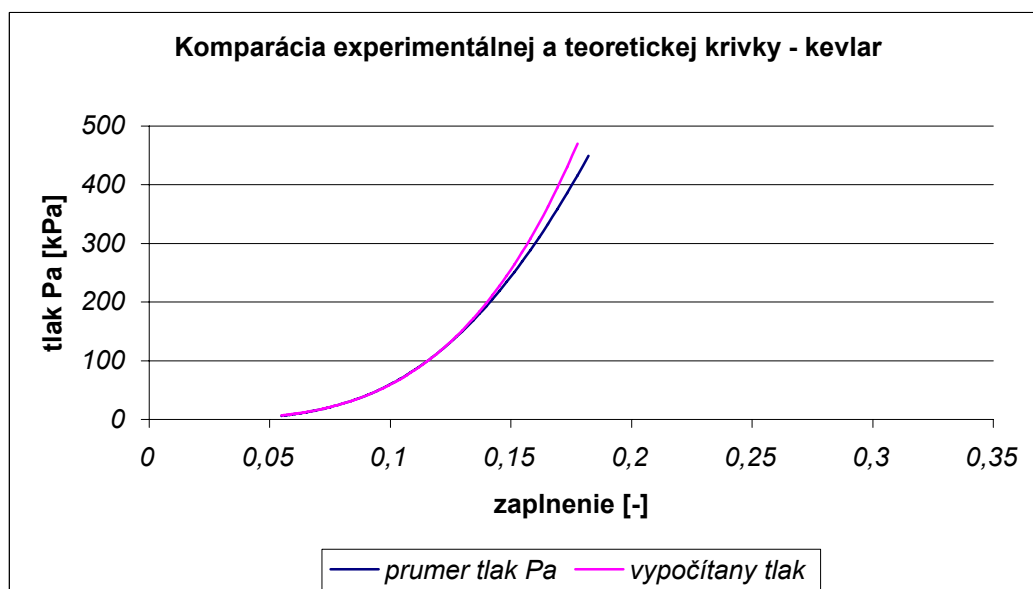
Graf 15: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pa PP 17 dtex.



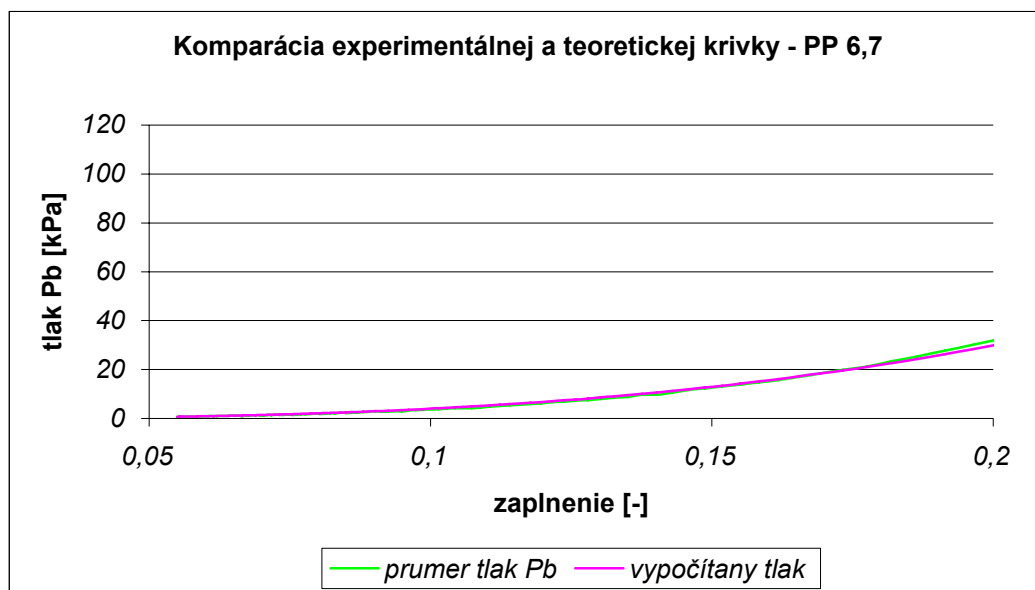
Graf 16: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pa PP 70 dtex.



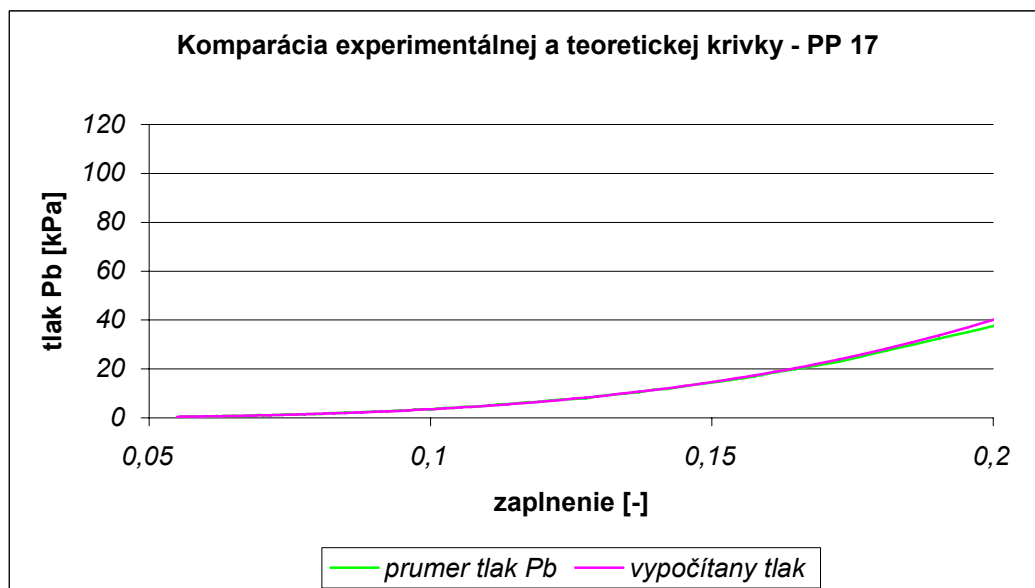
Graf 17: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pa kevlaru.



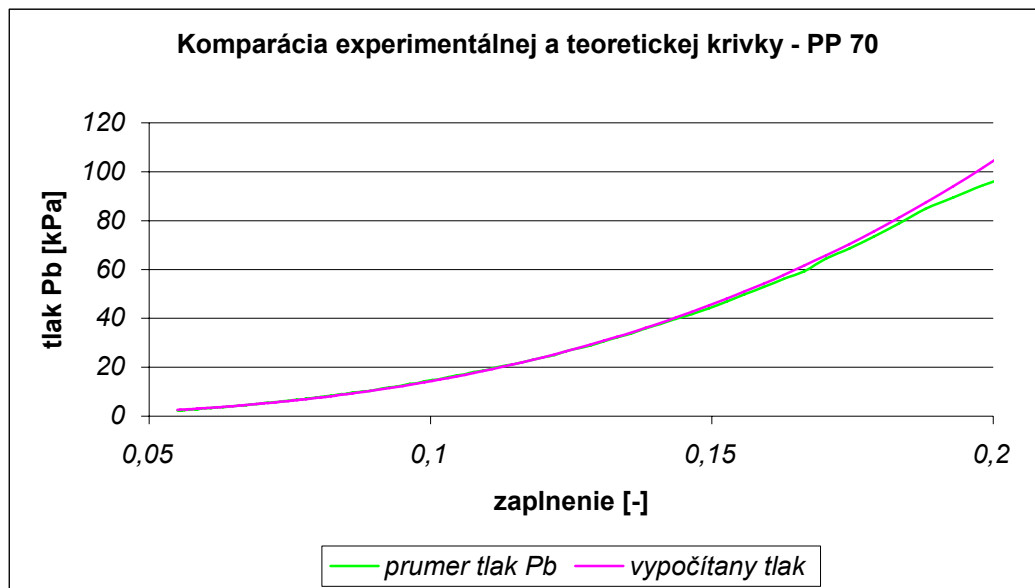
Graf 19: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pb PP 6,7 dtex.



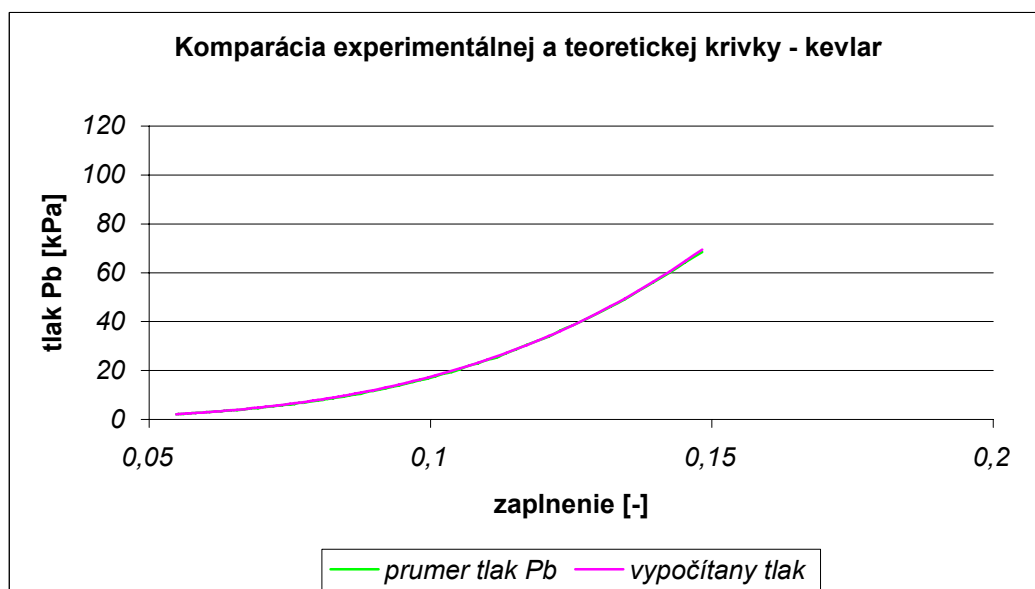
Graf 20: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pb PP 17dtex.



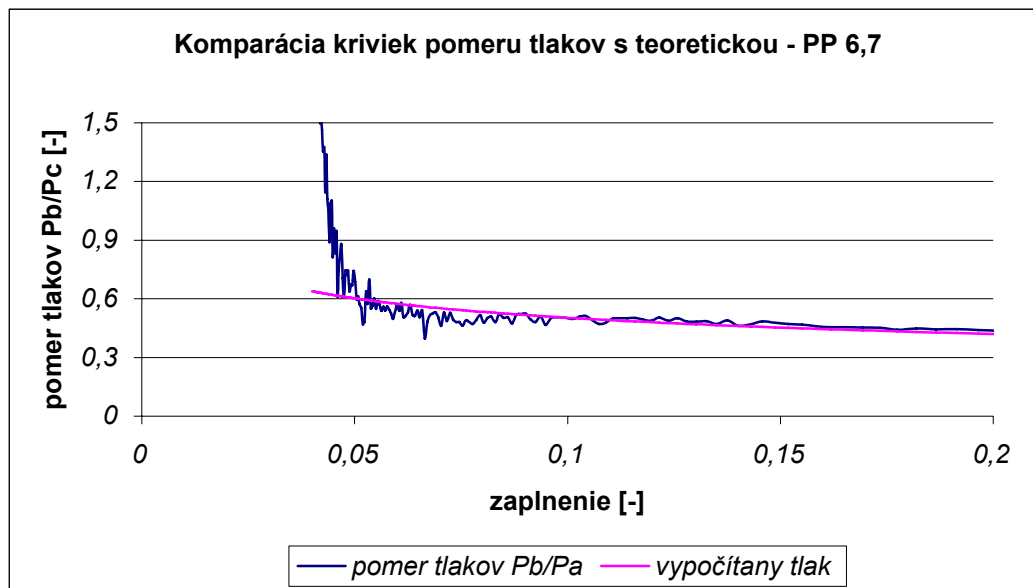
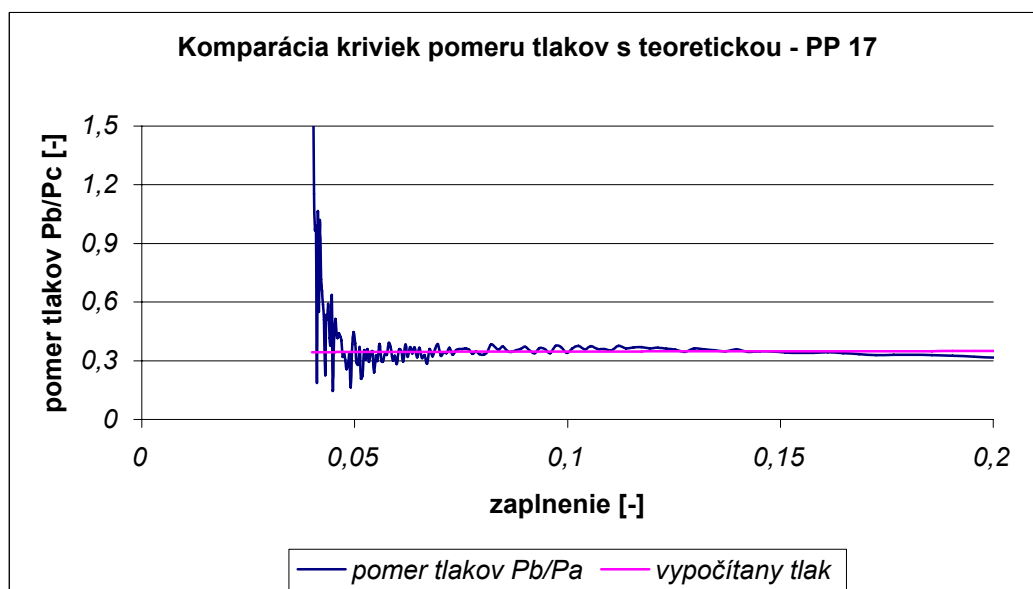
Graf 21: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pb PP 70 dtex.

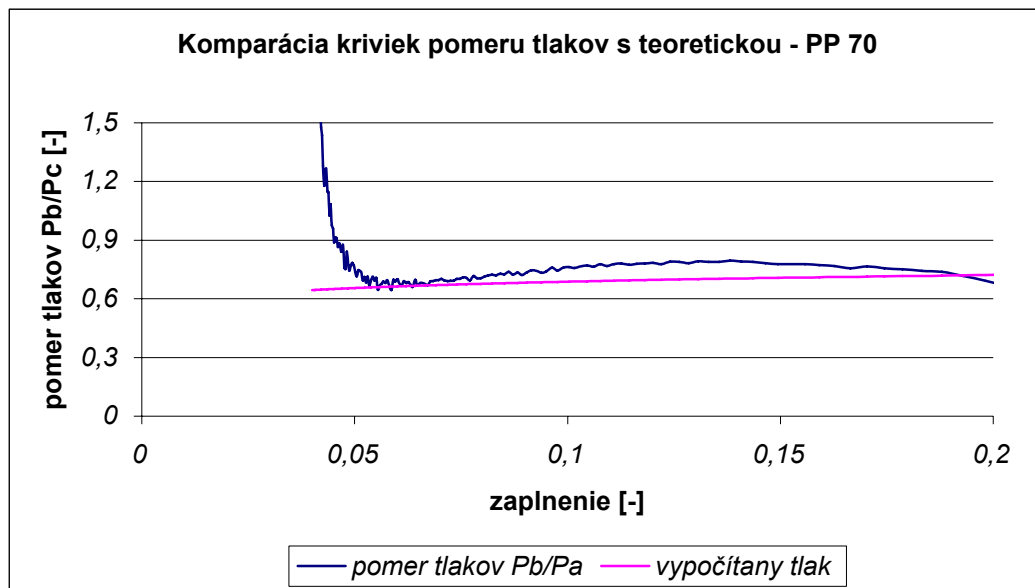


Graf 22: Porovnanie experimentálnej a teoretickej krivky tlaku Pb kevlaru.



Príloha III.

Graf 24: Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej PP 6,7 dtex.Graf 25: Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej PP 17 dtex.

Graf 26: Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej PP 70 dtex.Graf 27: Porovnanie kriviek pomeru tlakov P_b/P_a a teoretickej kevlaru.